

**Tecnologia CAM Aplicada no Fabrico por Fresagem
de Componentes Mecânicos**
Caracterização do processo de fresagem e dos componentes produzidos

Trabalho apresentado para a obtenção do grau de Mestre em
Equipamentos e Sistemas Mecânicos

Autor

PAULO JORGE DE OLIVEIRA SANTOS

Orientador

Professor Doutor Fernando António Gaspar Simões

Instituto Politécnico de Coimbra

Coimbra, Dezembro 2013

AGRADECIMENTOS

Os meus agradecimentos vão principalmente para o meu orientador, Professor Doutor Fernando António Gaspar Simões, que me acolheu muitas horas no seu gabinete, acompanhando-me sempre de perto, e dando-me confiança e motivação para realizar este trabalho que com a sua elevada dedicação e profissionalismo, me transmitiu sempre o seu conhecimento na área do CAD-CAM.

Gostaria de agradecer ao Engenheiro Paulo Amaro pelo apoio na maquinagem de ambos os procedimentos experimentais, ao colega Paulo Bento e Vítor Maranha pela ajuda que me concederam na parte da Engenharia Inversa, aos Professores Luís Roseiro, Luís Borrego e Pedro Ferreira e aos demais docentes do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra por todo o apoio prestado ao longo deste trabalho. Agradeço ainda à Direção do Agrupamento de Escolas de Anadia por autorizar a publicação das fotografias dos seus equipamentos oficinais.

Um agradecimento especial aos meus pais e aos meus amigos que me apoiaram durante este longo e enriquecedor ano de Mestrado.

RESUMO

Na fase inicial desta Dissertação foi realizada uma revisão abordando as operações por corte de arranque de apara mais comuns, considerando-se que estas seriam o torneamento, a furação mecânica e a fresagem, sendo esta última operação abordada de uma forma mais detalhada, uma vez que esta operação será o tema central de estudo neste trabalho. Realizou-se também um estudo mais elaborado sobre alguns fundamentos de fresagem como a maquinagem concordante e discordante, fatores que influenciam no acabamento final da maquinagem, diâmetro efetivo de corte para uma ferramenta de topo esférico, flexão da ferramenta, entre outros.

Temas como o CAD-CAM, CNC e Engenharia Inversa foram também particularizados neste trabalho, pois o conhecimento destes assuntos por parte do leitor seriam importantes para a compreensão do trabalho posteriormente desenvolvido.

Na parte seguinte deste trabalho foi realizada uma parte experimental. Um primeiro trabalho foi desenvolvido com base numa geometria a duas dimensões, onde foi necessária a realização das geometrias no *software* AUTOCAD® e posterior utilização do MASTERCAM® para criar os ciclos de maquinagem e, para um segundo trabalho, desta vez com base numa geometria a três dimensões, utilizou-se o SOLID-WORKS® para extração da Bucha e Cavidade e o MASTERCAM® para criar os ciclos de maquinagem. Ambos os trabalhos foram produzidos no Centro de maquinagem existente no Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

Palavras-chave: Fresagem; maquinagem; ferramenta de topo plano e ponta esférica; parâmetros de corte; CAD-CAM; CNC; engenharia inversa; centro de maquinagem; ciclos de maquinagem

ABSTRACT

In the initial phase of this Dissertation, a review was conducted addressing the most common coating of hard metal operations, considering that they would be turning, drilling and milling, this last operation will be discussed in a more detailed manner, since this operation will be the central theme of the present study. Also performed a more detailed study of some fundamentals of milling and machining as concordant discordant factors that influence the final finish machining, effective cutting diameter for a ball nose mill tool, tool deflection, among others.

Themes such as CAD - CAM, CNC and Reverse Engineering were also individualized in this work, because knowledge of these matters by the reader would be important for understanding the work subsequently developed.

In the next part of this work an experimental part was performed. A first study was developed based on a two-dimensional geometry, where it was necessary to perform the geometries in AUTOCAD® software and subsequent use of MASTERCAM® software to create the machining cycles, and for the second work, based on the three dimensions geometry, was used the SOLID -WORKS for the extraction of cavity and bushing and MASTERCAM® to create the machining cycles. Both works were produced in the existing machining center in the Department of Mechanical Engineering at the Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

Keywords: Milling; machining; end mill tools and ball nose mill tools; cutting parameters; CAD-CAM; CNC; reverse engineering; machining center; machining cycles

ÍNDICE

CAPITULO 1 – CONCEITOS DE MAQUINAGEM	1
1.1. OPERAÇÕES DE CORTE POR ARRANQUE DE APARA MAIS COMUNS.....	1
1.1.1. TORNEAMENTO.....	1
1.1.2. FURAÇÃO MECÂNICA.....	2
1.1.3. FRESAGEM.....	3
1.2. FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE FRESAGEM.....	4
1.2.1. EQUIPAMENTOS DE FRESAGEM.....	4
1.2.2. OPERAÇÕES.....	6
1.2.3. FERRAMENTAS.....	7
1.2.3.1. SELEÇÃO DE FRESAS DE TOPO PLANO.....	10
1.2.3.2. AVANÇO TIPO ESPIRAL A IMPLEMENTAR EM FRESAS DE TOPO PLANO.....	12
1.2.3.3. DIÂMETRO EFETIVO DE CORTE PARA UMA FERRAMENTA DE TOPO ESFÉRICO.....	13
1.2.3.4. FLEXÃO DA FERRAMENTA.....	16
1.2.4. PARÂMETROS DE CORTE.....	18
1.2.4.1. PARÂMETROS DE CORTE.....	18
1.2.4.2. CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE CORTE.....	19
1.2.5. MAQUINAGEM CONCORDANTE E DISCORDANTE.....	22
1.2.6. MAQUINAGEM COM FRESAS DE TOPO ESFÉRICO.....	24
1.2.7. CONDIÇÃO DE CONTACTO FERRAMENTA – PEÇA.....	25
CAPITULO 2 – SISTEMAS CAD-CAM.....	29
2.1. SISTEMAS CAD.....	29
2.1.1. INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS CAD.....	29
2.1.2. SISTEMAS DE PEQUENO PORTE.....	29
2.1.3. SISTEMAS DE MÉDIO PORTE.....	30
2.1.4. SISTEMAS DE GRANDE PORTE.....	32
2.2. MÁQUINAS E PROGRAMAÇÃO CNC.....	32
2.2.1. CENTRO DE MAQUINAGEM CNC.....	33
2.2.2. PAINEL DE CONTROLO DO CENTRO DE MAQUINAGEM.....	34
2.2.3. GRAUS DE LIBERDADE E SISTEMA DE EIXOS.....	37
2.2.4. CENTROS DE MAQUINAGEM MULTIEIXOS.....	38
2.3. PROGRAMAÇÃO CNC.....	40
2.3.1. APARECIMENTO E DESENVOLVIMENTO DO CNC.....	40
2.3.2. OS PASSOS DA OPERAÇÃO E TERMOS DA PROGRAMAÇÃO CN.....	42
2.4. SISTEMAS CAM.....	50
2.4.1. INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS CAM.....	50
2.4.2. EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS CAM.....	52
2.4.3. OPERAÇÕES DE FRESAGEM CNC PROGRAMADAS POR SISTEMAS CAM.....	53
2.4.4. TOLERÂNCIA E CÁLCULO DAS TRAJETÓRIAS DE FERRAMENTA.....	54
2.4.5. PÓS-PROCESSAMENTO.....	58
CAPITULO 3 – ENGENHARIA INVERSA.....	61
3.1. GENERALIDADES.....	61
3.2. SISTEMAS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS.....	62
3.3. TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS.....	64

CAPITULO 4 - TRABALHO EXPERIMENTAL.....	67
4.1.EQUIPAMENTO UTILIZADO.....	67
4.2.EXEMPLO 1 – TRABALHO 2D.....	68
4.2.1.GEOMETRIA CAD.....	68
4.2.2.PROGRAMAÇÃO DOS CICLOS DE MAQUINAGEM E RESULTADO OBTIDO.....	69
4.2.2.1.1º APERTO.....	73
4.2.2.2.2º APERTO.....	81
4.2.3.ENGENHARIA INVERSA.....	87
4.2.3.1.AQUISIÇÃO DE DADOS POR DIGITALIZAÇÃO.....	87
4.2.3.2.TRATAMENTO DA NUVEM DE PONTOS E MALHA POLIGONAL.....	89
4.3.EXEMPLO 2 – TRABALHO 3D.....	92
4.3.1.ENQUADRAMENTO DO TRABALHO.....	92
4.3.2.GEOMETRIA A MAQUINAR.....	92
4.3.3.PROGRAMAÇÃO DOS CICLOS DE MAQUINAGEM E RESULTADO OBTIDO.....	94
4.3.4.ENGENHARIA INVERSA.....	103
4.3.4.1.AQUISIÇÃO DE DADOS POR DIGITALIZAÇÃO.....	104
4.3.4.2.TRATAMENTO DA NUVEM DE PONTOS E MALHA POLIGONAL.....	104
CAPITULO 5 - CONCLUSÃO.....	107
CAPITULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
ANEXOS.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Operação de torneamento cilíndrico exterior exemplificando os três tipos de movimentos.....	1
Figura 1.2 – Torno Paralelo Optimum	2
Figura 1.3 – Diversas operações que podem ser realizadas com um Engenho de Furar.....	2
Figura 1.4 – Engenho de furar do tipo sensitivo	3
Figura 1.5 – Exemplo de algumas operações de fresagem.....	3
Figura 1.6 – Fresadora Universal.....	4
Figura 1.7 – Algumas das principais operações executadas com a fresadora vertical.....	5
Figura 1.8 – Fresa Cilíndrica.....	5
Figura 1.9 – Algumas das principais operações executadas com a fresadora horizontal.....	6
Figura 1.10 – Fresadora Universal.....	6
Figura 1.11 – Exemplo de algumas operações de fresagem	7
Figura 1.12 – Fresas inteiriças com diferentes características geométricas.....	8
Figura 1.13 – Exemplos de alguns tipos de fresas inteiriças e porta-pastilhas.....	8
Figura 1.14 – Roca realizando o facejamento.....	9
Figura 1.15 – Roca realizando o facejamento.....	9
Figura 1.16 – Fresas de Topo Plano.....	9
Figura 1.17 – Fresas de Topo Esférico.....	10
Figura 1.18 – Fresagem com Fresa de Topo Esférico.....	10
Figura 1.19 – Fresa de topo com corte sobre o centro.....	10
Figura 1.20 – Fresa de topo sem corte sobre o centro.....	11
Figura 1.21 – Escolha do número de canais.....	12
Figura 1.22 – Representação do avanço (a_p) tipo espiral numa fresa de topo plano	13
Figura 1.23 – Profundidade de Corte (A_p).....	14
Figura 1.24 – Diâmetro efetivo de corte numa ferramenta de topo esférico.....	14
Figura 1.25 – Diâmetro efetivo de corte numa ferramenta de topo esférico consoante a geometria a maquinar.....	15
Figura 1.26 – Flexão da Ferramenta.....	17
Figura 1.27 – Representação dos parâmetros de corte em fresagem frontal	19
Figura 1.28 – Maquinagem concordante e discordante.....	22
Figura 1.29 – Contorno exterior.....	23
Figura 1.30 – Contorno interior.....	23
Figura 1.31 – Altura da Crista	24
Figura 1.32 – Desbaste por ferramentas de topo plano e esférico.....	26
Figura 1.33 – Material remanescente da operação de desbaste	26
Figura 1.34 – Pontos de Contacto de uma Ferramenta de Ponta Esférica	28
Figura 2.1 – Desenho Técnico desenvolvido em <i>software</i> CAD de pequeno porte.....	30
Figura 2.2 – Desenho 3D desenvolvido em Solid Works.....	31
Figura 2.3 – Centro de Maquinagem e sua nomenclatura.....	33
Figura 2.4 – Painel de Controlo.....	36
Figura 2.5 – Representação da nomenclatura utilizada em sistema de coordenadas.....	37
Figura 2.6 – Peça maquinada por fresagem simultânea de 5 eixos.....	38
Figura 2.7 – Centro de maquinagem do tipo Mesa/Mesa	39
Figura 2.8 – Centro de maquinagem do tipo Árvore/Mesa	39
Figura 2.9 – Centro de maquinagem do tipo Árvore/Árvore	40
Figura 2.10 – Representação esquemática de uma máquina ferramenta de comando numérico computadorizado.....	40
Figura 2.11 – Sistema de coordenadas da máquina e da peça a maquinar	41
Figura 2.12 – Trajetória da ferram. entre a posição inicial (0,0,150) e final (300,200,50) em movimento de trabalho G01....	43

Figura 2.13 – G02 – interpolação circular no sentido inverso (Sentido dos ponteiros do relógio – C.W).....	44
Figura 2.14 – G03 – interpolação circular no sentido direto (Sentido contrário ao dos ponteiros do relógio – C.C.W).....	44
Figura 2.15 - Planos de trabalho para interpolação circular de trajetórias de ferramenta.....	45
Figura 2.16 - Planos Exemplo de interpolação circular no sentido inverso em coordenadas relativas.....	45
Figura 2.17 – Interpolação circular no sentido direto (G03) em coordenadas absolutas (G90).....	46
Figura 2.18 – Representação esquemática dos 3 planos de trabalho.....	46
Figura 2.19 – Representação esquemática da compensação do raio da ferramenta.....	47
Figura 2.20 – Simulação de Maquinagem através de um <i>software</i> CAM (MASTERCAM®).....	51
Figura 2.21 – Fabrico de Moldes num Centro de Maquinagem.....	51
Figura 2.22 – Utilização no mundo de <i>software</i> CAM em percentagem.....	52
Figura 2.23 – Exemplo de programação de uma operação <i>Contour</i> no <i>software</i> MASTERCAM®.....	53
Figura 2.24 – Diferentes trajetórias de ferramenta para 3 eixos no MASTERCAM®.....	54
Figura 2.25 - Trajetórias de ferramenta sobre geometrias complexas.....	54
Figura 2.26 - Malha gerada com diferentes tolerâncias.....	55
Figura 2.27 - Tolerância da trajetória da ferramenta.....	56
Figura 2.28 - Trajetória da ferramenta calculada por um sistema CAM.....	57
Figura 2.29 – Cálculo das trajetórias de ferramenta.....	57
Figura 2.30 – Procedimentos da etapa de pós-processamento para a construção de programas NC.....	59
Figura 3.1 – Integração da Engenharia Inversa no Processo Produtivo.....	62
Figura 3.2 – Funcionamento do sistema de varredura por laser.....	63
Figura 3.3 – Princípio da operação <i>time-of-flight</i>	63
Figura 3.4 – Princípio da operação de triangulação por feixe de laser.....	63
Figura 3.5 - Aspeto de uma malha não tratada no <i>software</i> GEOMAGIC®.....	64
Figura 3.6 – Preenchimento de falha na malha.....	64
Figura 3.7 – Aspeto de escultura depois de sujeita ao tratamento e suavização da malha.....	65
Figura 4.1 – Ambiente de Trabalho do MASTERCAM®.....	67
Figura 4.2 – Visualização de algum do equipamento adotado.....	68
Figura 4.3 – Vista inferior e superior do Exemplo 1 - Trabalho 2d.....	69
Figura 4.4 – Importação das geometrias CAD para o MASTERCAM®.....	70
Figura 4.5 – Criação do <i>Stock Setup</i>	71
Figura 4.6 – Definição dos zero peça.....	72
Figura 4.7 – Ferramentas utilizadas na maquinação do trabalho 2D.....	72
Figura 4.8 - Simulação dos primeiros quatro Ciclos de Maquinagem relativos ao 1º Aperto.....	74
Figura 4.9 – Opção utilizada na Terceiro ciclo de Maquinagem do 1º Aperto.....	75
Figura 4.10 – Fresa cônica com 3º utilizada no 4º Ciclo de maquinagem <i>Contour (Ramp)</i> para realização do cone.....	75
Figura 4.11 – Simulação do segundo grupo de quatro Ciclos de maquinagem relativos ao 1º Aperto.....	76
Figura 4.12 – <i>Linking Parameters</i> do Ciclo de Maquinagem <i>Pocket (Facing)</i>	77
Figura 4.13 – Opção utilizada no sexto ciclo de Maquinagem do 1º Aperto (Figura 4.11 – b).....	77
Figura 4.14 – Simulação do terceiro grupo de quatro Ciclos de Maquinagem relativos ao 1º Aperto.....	78
Figura 4.15 - Definição no MASTERCAM® da Ferramenta de Chanfrar.....	79
Figura 4.16 – Definição no MASTERCAM® da Fresa de disco.....	79
Figura 4.17 – Diferentes etapas de maquinagem relativas ao 1º Aperto.....	80
Figura 4.18 – Defeitos encontrados na maquinagem do 1º Aperto.....	81
Figura 4.19 – Perspetiva do lado contrário ao 1º aperto da peça que irá ser maquinada (2º Aperto).....	81
Figura 4.20 – Simulação do primeiro grupo de três Ciclos de Maquinagem relativos ao 2º Aperto.....	83
Figura 4.21 – Simulação do segundo e último grupo de quatro Ciclos de Maquinagem relativos ao 2º Aperto.....	81
Figura 4.22 – Definição no MASTERCAM® da ferramenta utilizada.....	84
Figura 4.23 – Lista dos Ciclos de Maquinagem criados para executar o Exemplo 1 – Trabalho 2D.....	85
Figura 4.24 – Diferentes etapas de maquinagem relativas ao 2º Aperto.....	85
Figura 4.25 – Aspeto da peça envernizada.....	86

Figura 4.26 – 3D Laser Scanner LPX-600.....	87
Figura 4.27 - Peça colocada no centro do prato do Scanner.....	88
Figura 4.28 – Nuvens de Pontos em ambiente Geomagic.....	89
Figura 4.29 – Resultados da nuvem de pontos e malha poligonal.....	90
Figura 4.30 – Aspeto da malha poligonal.....	90
Figura 4.31 – Aspeto superficial da peça.....	91
Figura 4.32 – Aspeto da malha poligonal.....	91
Figura 4.33 – Vista em Perspetiva da malha poligonal da peça após tratamento.....	92
Figura 4.34 – Perspetiva, vista superior e corte da saboneteira.....	93
Figura 4.35 – Extração da Cavidade através da aplicativo Mold Tools do SOLID-WORKS®.....	94
Figura 4.36 – Geometria 3D do molde Importada para o MASTERCAM®.....	95
Figura 4.37 - Criação do Mapa de Portugal e Texto no <i>software</i> MASTERCAM®.....	95
Figura 4.38 – Criação do <i>Stock Setup</i>	96
Figura 4.39 – Definição do zero peça.....	96
Figura 4.40 – Ferramentas utilizadas na maquinagem do trabalho 3D.....	97
Figura 4.41 - Simulação das trajetórias de maquinagem relativas ao 1º Ciclo.....	98
Figura 4.42 – Simulação das trajetórias de maquinagem relativas ao 2º Ciclo.....	99
Figura 4.43 – Definição no MASTERCAM® da fresa de topo esférico.....	99
Figura 4.44 - Simulação das trajetórias de maquinagem relativas ao 3º e 4º Ciclo.....	100
Figura 4.45 - Realização do <i>STL COMPARE</i>	101
Figura 4.46 – Simulação do 5º Ciclo de Maquinagem com a estratégia <i>Contour 2D</i>	101
Figura 4.47 – Diferentes etapas de maquinagem do Trabalho 3D.....	103
Figura 4.48 – Aspeto da superfície do molde depois de realizado o polimento.....	103
Figura 4.49 – Molde pulverizado com o pó revelador, colocado no centro do prato do Scanner e posicionado na vertical.....	104
Figura 4.50 – Nuvens de pontos em ambiente Geomagic.....	105
Figura 4.51 – Resultado da malha poligonal.....	105
Figura 4.52 – Diferença dimensional global entre a geometria CAD original e o molde digitalizado.....	106

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 – Vantagens relativamente ao Número de Canais.....	12
Tabela 1.2 – Avanço tipo espiral recomendado, consoante o tipo de material a cortar e o diâmetro da ferramenta.....	13
Tabela 1.3 – Valores dos diâmetros efetivos (De) [mm] considerando fresagem de topo.....	16
Tabela 1.4 – Velocidade de Corte (Vc) e Avanço por Gume de Corte (fz) para Fresagem.....	20
Tabela 1.5 – Velocidade de Corte (Vc) e Avanço por Rotação (fr) para Furação.....	21
Tabela 1.6 – Vantagens e desvantagens do corte concordante e discordante.....	23
Tabela 1.7 – Valores da Altura da Crista (<i>Scallop height</i>) em milímetros.....	25
Tabela 2.1 – Principais funções preparatórias.....	48
Tabela 2.2 – Principais funções auxiliares.....	49
Tabela 4.1 – Ferramentas Utilizadas.....	72
Tabela 4.2 – Parâmetros de corte para maquinagem do trabalho 2D.....	73
Tabela 4.3 – Tempos de Maquinagem dos Ciclos utilizados calculados no MASTERCAM®.....	86
Tabela 4.4 – Especificações técnicas do equipamento utilizado.....	87
Tabela 4.5 - Ciclos <i>Surface High Speed</i> do MASTERCAM® para 3 eixos.....	96
Tabela 4.6 – Ferramentas Utilizadas.....	97
Tabela 4.7 – Parâmetros de corte para maquinagem do trabalho 2D.....	98
Tabela 4.8 – Tempos de Maquinagem dos Ciclos Utilizados.....	102

SIMBOLOGIA

- ae – Sobreposição entre passagens (*Stepover*) (eq. 1.10)
Ap – Profundidade de corte (eq. 1.2)
Ar – Área do material remanescente (eq. 1.12)
D – Diâmetro da fresa (eq. 1.1)
D_{bmax} – Diâmetro máximo possível de furação (eq. 1.1)
Dc – Diâmetro da secção transversal (eq. 1.4)
D₁ – Diâmetro efetivo de corte
E – Módulo de elasticidade ou módulo de Young (eq. 1.3)
e – erro dimensional
F – Força Radial (eq. 1.3)
f – Velocidade de avanço da mesa no plano XY (eq. 1.7)
fr – Avanço por rotação (eq. 1.9)
fz – Avanço por navalha (eq. 1.7)
H – Comprimento da secção transversal de material remanescente (eq. 1.13)
h – Altura da crista (*Scallop height*) (eq. 1.10)
I – Momento de inércia da secção transversal (eq. 1.3)
L – Comprimento da ferramenta (eq. 1.3)
n – velocidade de rotação (eq. 1.6)
P – Velocidade de avanço da ferramenta no eixo z (eq. 1.8)
y_m – Flexão da ferramenta (eq. 1.3)
R – Raio da aresta da fresa (eq. 1.1)
R – Raio da ferramenta (eq. 1.2)
R₁ – Raio efetivo de corte (eq. 1.2)
t0 – Impulso de Laser enviado na direção do objeto
t1 – Impulso quando atinge a superfície do objeto sendo parte do feixe refletido na direção do sensor
t2 – Tempo entre a emissão e retorno do feixe de laser, assim como a intensidade de retorno
Vc – Velocidade de corte (eq. 1.6)
Vf – Velocidade de avanço (eq. 1.9)
z – Número de navalhas por fresa (eq. 1.7)

ABREVIATURAS

CA – Computer Aided
CAD - Computer Aided Design
CAD/CAM – Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing
CAE – Computer Aided Engineering
CAI - Computer Aided Inspection
CAM - Computer Aided Manufacturing
CAx – Diferentes etapas de engenharia, auxiliadas por computador
CC – Cutter Contact
CCD – Dispositivo de carga acoplada
CD – Compact Disc
CL – Cutter Location
CMM – Máquina de medir coordenadas
CNC – Controlo Numérico Computorizado
DIN – Instituto Alemão para a normalização
DXF - Drawing Exchange Format
FANUC – Fujitsu Automated Numeric Control
HSC – High Speed Cutting
ISEC – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra
LADAR – Laser detection and ranging
LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance
M.I.T – Massachusettes Institutes of technology
RS 232 – Padrão para troca serial de dados binários entre um DTE (Data Terminal Equipment) e um DCE (Data communication equipment)
STL – Stereolithography (Formato de ficheiro)
TXT – Formato de ficheiro do tipo texto
USB – Universal Serial Bus

1. CONCEITOS DE MAQUINAGEM

1.1. OPERAÇÕES DE CORTE POR ARRANQUE DE APARA MAIS COMUNS

A grande utilização dos processos de maquinagem deve-se à diversidade de geometrias que podem ser obtidas, ao alto grau de precisão dimensional e acabamento superficial e ao facto de não haver alterações substanciais nas propriedades do material. Estas características fazem com que na grande maioria dos casos, os processos de maquinagem não possam ser substituídos por nenhum outro processo de fabrico.

Embora existam diversos tipos de processos de maquinagem, ir-se-á neste capítulo realizar uma breve abordagem aos mais comuns, ou seja, o Torneamento, a Furação e a Fresagem.

1.1.1. TORNEAMENTO

O torneamento consiste na obtenção de superfícies de revolução, por arranque de apara, através da combinação do movimento de rotação da peça, com o movimento de uma ferramenta cortante.

Para executar o torneamento são necessários três movimentos entre a peça e a ferramenta, sendo estes o movimento de corte que é o movimento de rotação da peça, o movimento de avanço que é o movimento que desloca a ferramenta ao longo da superfície da peça e o movimento de penetração, sendo este o movimento que determina a profundidade do corte.

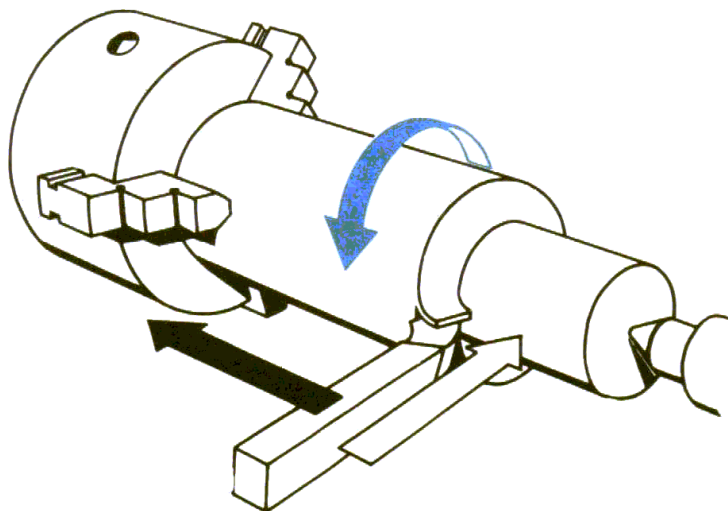


Figura 1.1 – Operação de torneamento cilíndrico exterior exemplificando os três tipos de movimentos.

Um dos principais equipamentos utilizados no torneamento é o torno paralelo ou universal porque consegue resolver a maioria das dificuldades que se deparam no fabrico de peças.



Figura 1.2 – Torno Paralelo Optimum.

1.1.2. FURAÇÃO MECÂNICA

A furação mecânica é uma das operações mais usadas que consiste no corte com levantamento de apana, recorrendo a ferramentas, denominadas brocas, e utilizando equipamentos denominados de máquinas de furar ou engenhos de furar.

Esta operação permite a abertura de furos que podem ser passantes ou cegos e podem ter como finalidade receber parafusos, pinos, veios, êmbolos, etc. Numa furadora para além de se furar executam-se outras operações como alargar, mandrilar, rebaixar ou escarear (Completo *et al*, 2009).

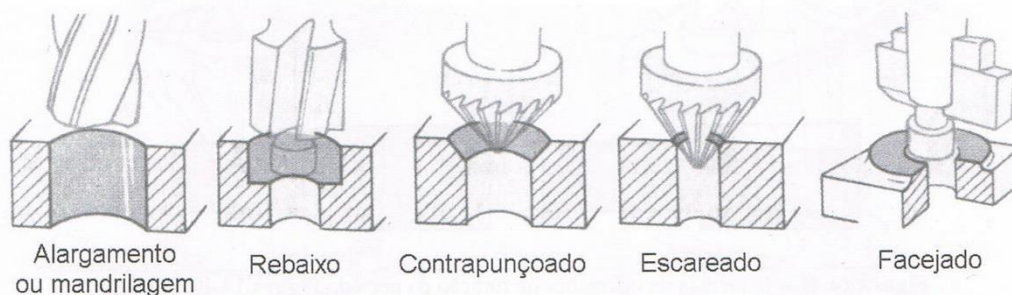


Figura 1.3 – Diversas operações que podem ser realizadas com um Engenho de Furar.

O furo com broca produz um acabamento superficial que pode ser melhorado com um mandril, montado do mesmo modo que a broca no engenho de furar, devendo neste caso o acabamento ser especificado no desenho.

O engenho de furar é uma máquina na qual se podem realizar operações de furação, de roscagem e de mandrilagem. Um dos tipos muito utilizados deste tipo de engenhos de furar, são as sensitivas, onde o movimento de penetramento é feito manualmente pelo operador. Depende da sensibilidade desde a pressão exercida numa alavanca da máquina para que a ferramenta penetre a peça.



Figura 1.4 – Engenho de furar do tipo sensitivo.
(Cortesia Agrupamento Escolas de Anadia)

1.1.3. FRESAGEM

A fresagem é uma operação em que o material é levantado por corte de arranque de aparas por uma ferramenta rotativa de aresta múltipla, a fresa, a máquina que realiza esta operação denomina-se fresadora.

Podem ser realizadas outras operações com a fresadora como a furação, mandrilagem e roscagem com macho. Pela operação de fresagem podemos obter peças com superfícies planas, com entalhes, rodas dentadas, dentes, etc.

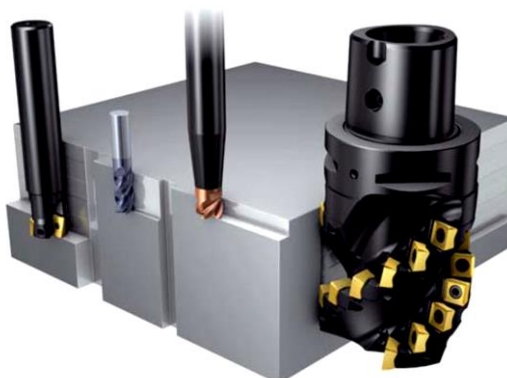


Figura 1.5 – Exemplo de algumas operações de fresagem.

As fresadoras podem ser de eixo vertical, horizontal ou universais, permitindo as últimas posicionar a ferramenta segundo qualquer um dos eixos referidos ou segundo um qualquer eixo oblíquo.

De uma maneira geral, a ferramenta roda em torno de um eixo de rotação fixo e a peça a fresar é deslocada manual ou automaticamente para a ferramenta. Como acontece em todo o tipo de maquinagem que envolve movimento relativo peça-ferramenta, a velocidade do movimento é condicionada, fundamentalmente, pelo material da peça a maquinar e condiciona, por seu turno, o seu acabamento superficial.



Figura 1.6 – Fresadora Universal.
(Cortesia Agrupamento de Escolas de Anadia)

1.2. FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE FRESAGEM

1.2.1. EQUIPAMENTOS DE FRESAGEM

Como já referido no capítulo anterior este tipo de máquinas, apesar de terem alguns aspetos construtivos comuns, distinguem-se em função da árvore principal e podem assim ser divididos em verticais, horizontais ou universais.

Denominam-se de verticais, quando o eixo-árvore ocupa a posição vertical, perpendicular à superfície da máquina (figura 1.7). A peça pode ser trabalhada segundo o eixo vertical (movimento em Z) subindo ou descendo a fresa, segundo o eixo vertical Y e segundo o eixo horizontal X.

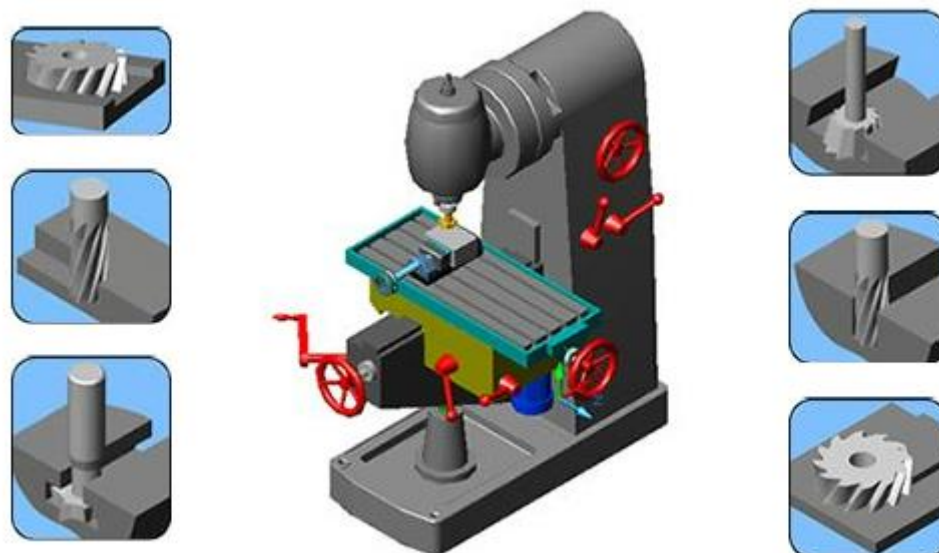


Figura 1.7 – Algumas das principais operações executadas com a fresadora vertical.

As fresadoras horizontais são aquelas em que a posição da árvore é somente na horizontal. A fresadora horizontal, utiliza a fresa montada sobre o eixo horizontal. É utilizado para trabalho de facejamento na horizontal e para efetuar ranhuras e perfis retilíneos. A ferramenta mais utilizada é a fresa cilíndrica.



Figura 1.8 – Fresa Cilíndrica.

Neste caso (figura 1.9) existem tal como nas fresadoras verticais, três movimentos na mesa onde é apertada a peça a maquinar, um vertical e dois horizontais.

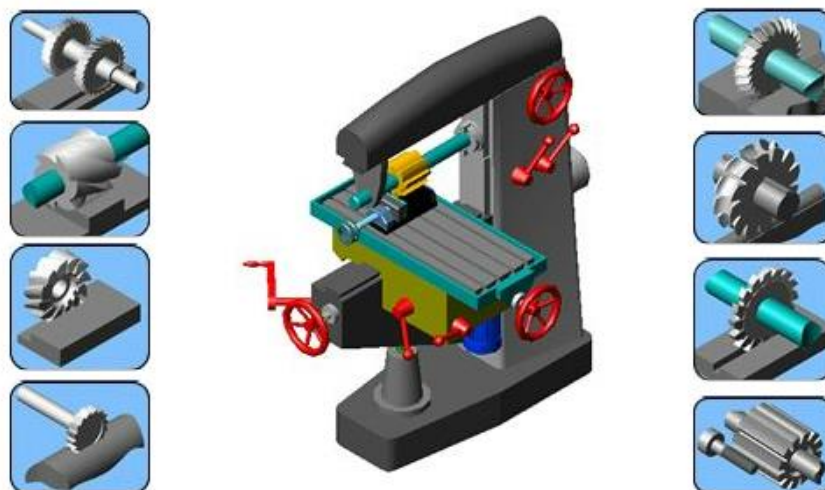


Figura 1.9 – Algumas das principais operações executadas com a fresadora horizontal.

As fresadoras universais (figura 1.10) permitem posicionar a ferramenta segundo um dos eixos, vertical, horizontal ou segundo um qualquer eixo oblíquo.

Normalmente, este tipo de fresadoras apresenta um cabeçote articulado universal que permite executar formas e perfis variados. Uma das características mais importantes destas fresadoras reside na possibilidade de se acoplar à mesa de trabalho um aparelho divisor diferencial, permitindo assim realizar ranhuras helicoidais ao longo de uma superfície cilíndrica (Completo *et al*, 2009).



Figura 1.10 – Fresadora Universal.

1.2.2. OPERAÇÕES

Existem diversos tipos de operações de fresagem que se podem realizar dependendo do tipo de máquina a utilizar. É possível realizar através deste processo facejamentos, peças com ranhuras, entalhes, rodas dentadas, etc., tal como está exemplificado na figura seguinte.

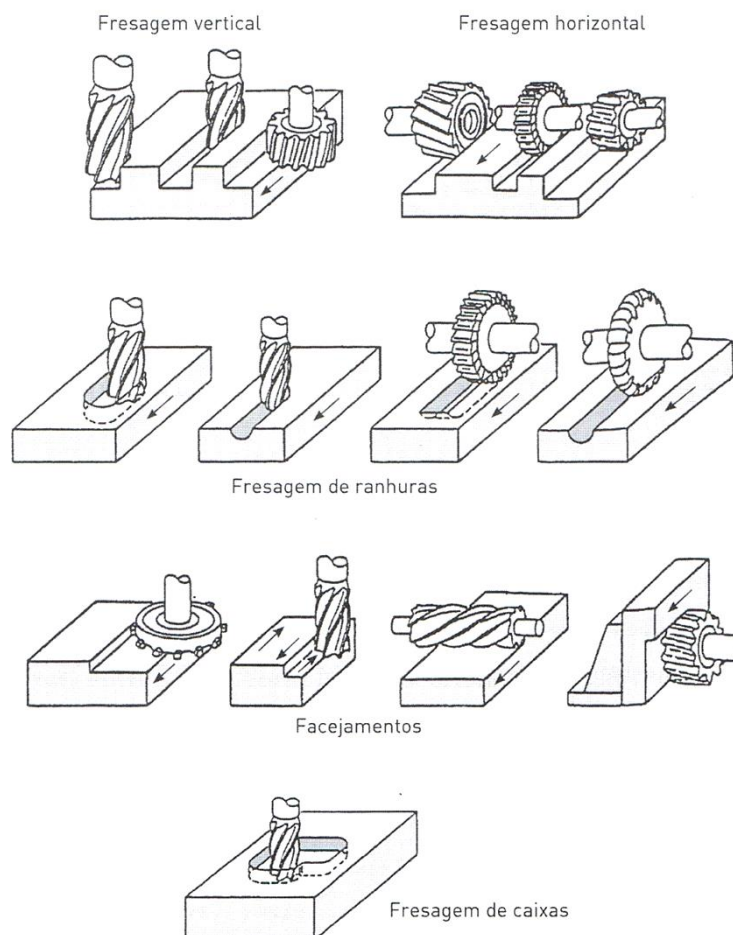


Figura 1.11 – Exemplo de algumas operações de fresagem (Completo *et al*, 2009).

Além das operações de fresagem propriamente ditas, podem ainda ser realizadas operações de furação, roscagem com macho e mandrilagem.

1.2.3. FERRAMENTAS

Segundo Souza e Ulbrich (2009), as fresas podem ser classificadas principalmente em Inteiriças e Porta-Pastilhas.

Nas inteiriças, as regiões da ferramenta que realizam o corte e a haste de fixação da ferramenta representam um único corpo (figura 1.12).

Relativamente às matérias-primas mais usuais no fabrico de ferramentas, as fresas podem ser de aço rápido ou metal duro, sendo este último o que representa a matéria-prima mais evoluída para estas ferramentas pois permite uma fresagem com elevadas velocidades de corte e mantendo uma razoável vida útil se comparado com o material anterior.

Além da matéria-prima, as ferramentas podem possuir um revestimento superficial para auxiliar a “permuta” térmica no momento do corte, assim como propiciar um agente antiabrasivo, prolongando a vida útil da ferramenta e permitindo superiores velocidades de trabalho.



Figura 1.12 – Fresas inteiriças com diferentes características geométricas, (Souza e Ulbrich, 2009).

No caso das fresas Porta-Pastilhas, as respectivas pastilhas são fabricadas por sinterização e recebem um tratamento superficial.

As pastilhas são fixadas às ferramentas por um parafuso de fixação e as suas faces podem ser rodadas quando apresentarem desgaste.

Este tipo de ferramentas embora sejam mais económicas, pois no final da vida útil apenas são alteradas as pastilhas, as ferramentas inteiriças ainda possuem um amplo espaço de trabalho porque permitem operações de maquinagem com maior precisão, o que resulta num melhor resultado na qualidade final.

Uma gama de diferentes ferramentas de corte para fresagem pode ser vista na figura seguinte:

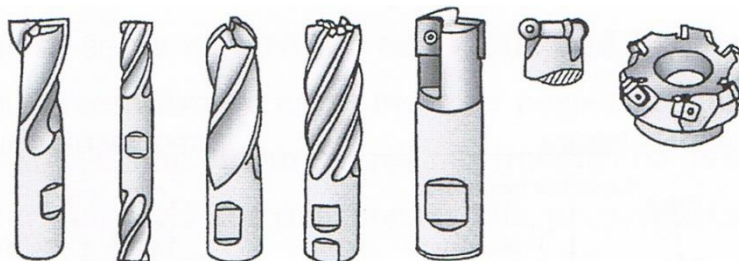


Figura 1.13 – Exemplos de alguns tipos de fresas inteiriças e porta-pastilhas (Completo *et al*, 2009).

Entre as ferramentas de corte rotativas mais usuais encontram-se as Fresas Porta Pastilhas de Facejar, vulgarmente conhecidas por rocas (*Face Mill Tools*), estas servem para realizar o facejamento da peça em causa, tal como é possível visualizar nas figuras seguintes.



Figura 1.14 – Roca realizando o facejamento.



Figura 1.15 – Roca realizando o facejamento.

Não menos utilizadas são as denominadas de Fresas de Topo Plano (*End Mill Tools*). Estas são aplicadas na maquinagem de rasgos, contornos, rebaixos, rasgos de diferentes tipos e tamanhos e fresagem de contornos.



Figura 1.16 – Fresas de Topo Plano.

Por vezes também utilizadas, especialmente em Centros de Maquinagem CNC e que irão ser posteriormente abordadas neste trabalho, são as Fresas de Topo Esférico (*Ball Nose Mill*

Tools) que podemos visualizar nas figuras seguintes. Estas podem ter 2, 3 ou 4 arestas de corte helicoidais e destinam-se ao fresamento de canais cilíndricos, tronco-cónicos e superfícies complexas a 3 ou mais eixos.



Figura 1.17 – Fresas de Topo Esférico.



Figura 1.18 – Fresagem com Fresa de Topo Esférico.

1.2.3.1. SELEÇÃO DE FRESAS DE TOPO DE PLANO

As fresas de topo podem ser divididas quanto às arestas de corte na extremidade em:

- Com corte sobre o centro (figura 1.19);

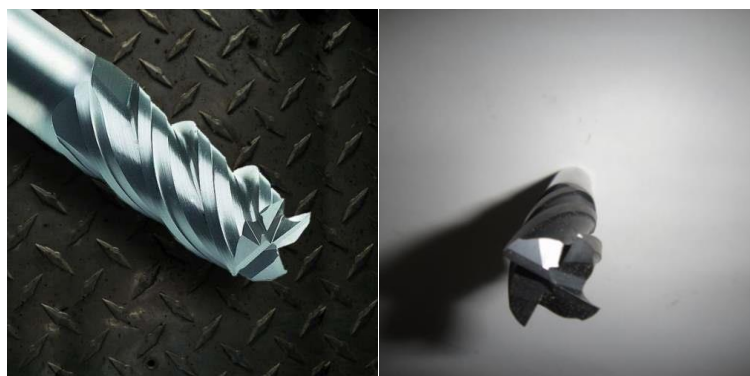


Figura 1.19 — Fresa de topo com corte sobre o centro.

Estas permitem operações de furação e mergulho. Duas arestas atingem o centro no caso de um número par de canais e somente uma aresta no caso de número ímpar.

Não é aconselhável a furação com uma fresa de topo com mais do que quatro arestas de corte.

- Sem corte sobre o centro (figura 1.20):

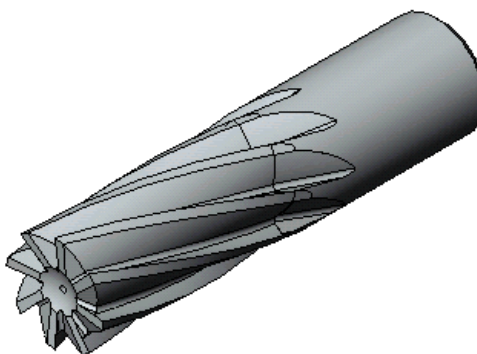


Figura 1.20 — Fresa de topo sem corte sobre o centro (Dormer-Tools, 2009).

Este tipo de fresas são usadas somente para perfilamento e rasgos abertos.

Na literatura, é usual classificar as ferramentas de acordo com o número e/ou a geometria das arestas de corte, tal como foi apresentado anteriormente para as ferramentas com ou sem corte ao centro. Contudo, é também possível classificar as ferramentas de acordo com o número e/ou a geometria dos canais de extração da apara, tal como é exemplo o estudo apresentado em seguida. Chama-se à atenção do leitor para o facto de que a cada aresta de corte estar sempre associado um canal de extração da apara.

O número de canais é determinado pelo material a ser fresado, dimensão da peça de trabalho e condições de fresagem. Na figura 1.21 e na tabela 1.1 são apresentadas algumas das características das fresas de igual diâmetro, em função do número de canais existentes.

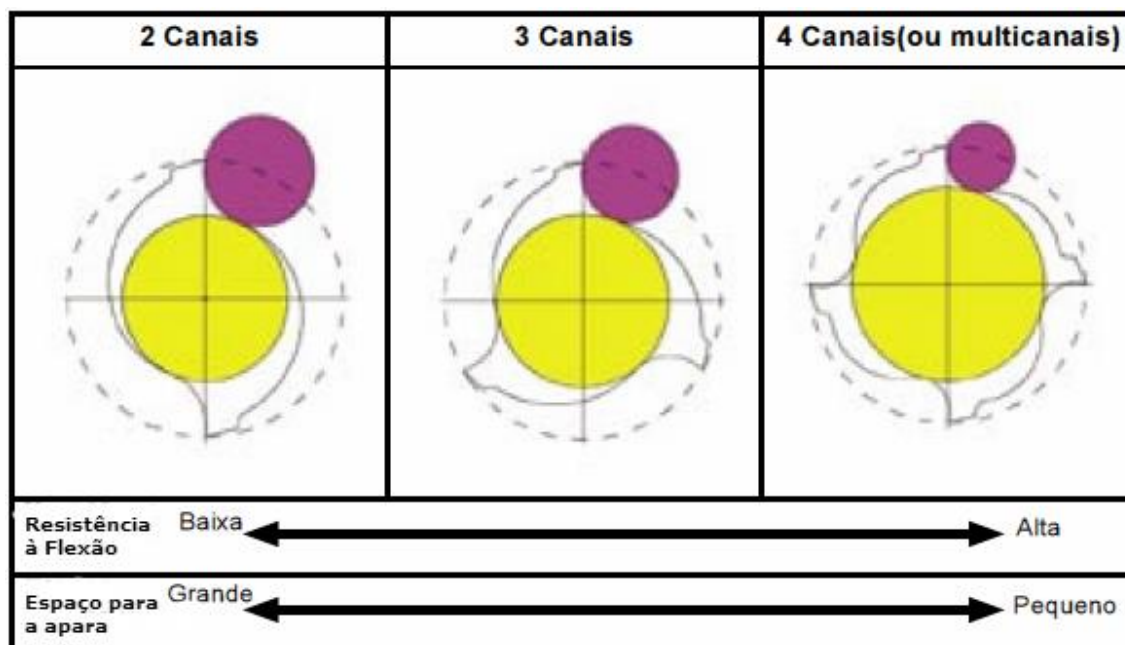


Figura 1.21 — Escolha do número de canais (Dormer-Tools, 2009).

Tabela 1.1 - Vantagens relativamente ao Número de Canais.

Nº de Canais	2 Canais	3 Canais	4 Canais ou Multicanais
Características	<ul style="list-style-type: none"> - Grande espaço para aparas; - Saída de aparas com facilidade; - Ideal para fresar rasgos; - Ideal para fresagem “pesada”; - Baixa resistência à flexão devido à pequena área transversal; - Acabamento superficial de qualidade inferior. 	<ul style="list-style-type: none"> - Espaço para aparas quase tão grande como para 2 canais; - Área transversal maior, o que faz com que tenha uma maior resistência à flexão do que para 2 canais; - Melhor acabamento da superfície. 	<ul style="list-style-type: none"> - Grande área transversal e elevada resistência à flexão; - Produz melhor acabamento da superfície; - Recomendado para perfilar, fresagem lateral e rasgos pouco profundos.

1.2.3.2. AVANÇO TIPO ESPIRAL A IMPLEMENTAR EM FRESAS DE TOPO PLANO

Muitas das vezes em centros de maquinagem, utilizam-se para as fresas de topo plano entradas da ferramenta no corte de material, avanços do tipo espiral, previamente programadas em CAM.

As recomendações para estas espirais em diferentes tipos de materiais são apresentadas na tabela 1.2 (Dormer – Tools, 2009):

Tabela 1.2 – Avanço tipo espiral recomendado, consoante o tipo de material a cortar e o diâmetro da ferramenta (Dormer-Tools, 2009).

Material	a_p recomendado
Aço	$< 0,10 \times D$
Alumínio	$< 0,20 \times D$
Aço temperado	$< 0,05 \times D$

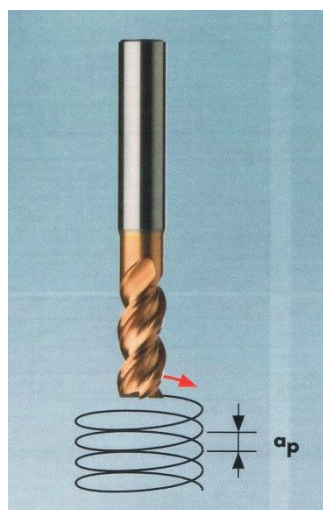


Figura 1.22 - Representação do avanço (a_p) tipo espiral numa fresa de topo plano (Dormer-Tools, 2009).

$$D_{b\acute{m}ax} = 2 * (D - R) \quad (1.1)$$

Sendo:

$D_{b\acute{m}ax}$ – Diâmetro máximo recomendado para a espiral [mm];

D – Diâmetro da fresa [mm];

R – Raio da aresta da fresa [mm].

Deve-se utilizar o diâmetro máximo (próximo de $D_{b\acute{m}ax}$) para uma boa evacuação das aparas.

1.2.3.3. DIÂMETRO EFETIVO DE CORTE PARA UMA FERRAMENTA DE TOPO ESFÉRICO

Na fresagem de superfícies complexas, utilizando-se uma ferramenta de topo esférico, existem poucas ocasiões em que a ferramenta utiliza o seu diâmetro nominal para realizar o corte. Na maior parte dos casos, a região de contacto entre a ferramenta e a peça varia entre o seu centro (diâmetro zero) e um valor que dependerá da profundidade de corte e da inclinação da superfície (Chiang et al, 1995).

Na figura seguinte, pode-se visualizar o resultado da superfície maquinada, obtido com uma fresa de topo esférico. A superfície é caracterizada por a designada Altura da Crista (h). Note-

se que é importante ter a noção de que o valor h é diferente do valor da Profundidade de Corte (A_p).

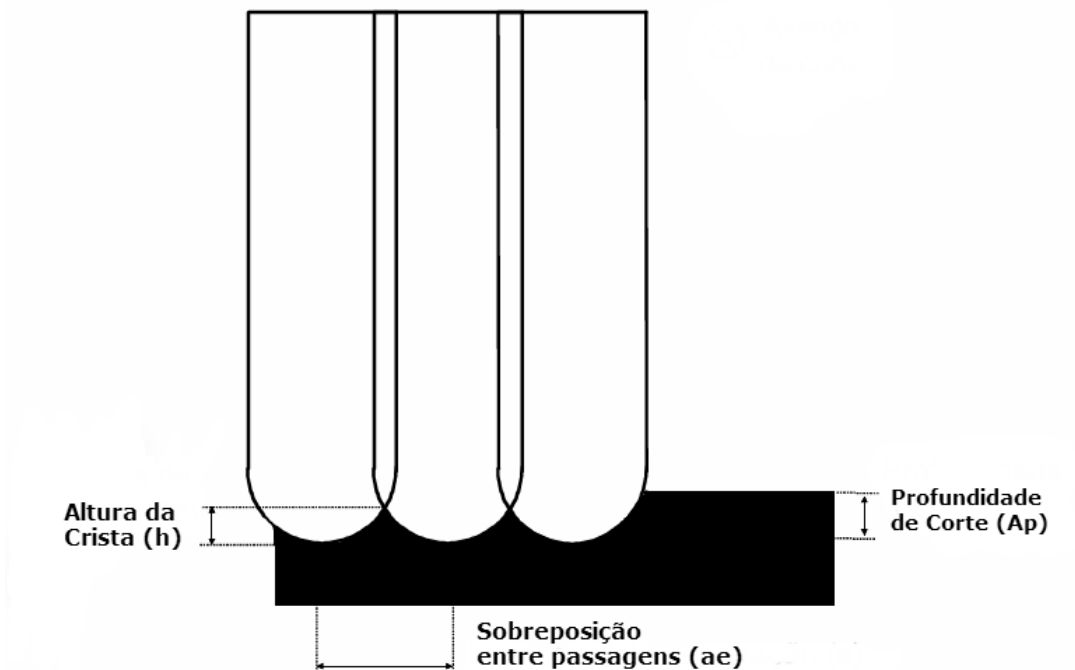


Figura 1.23 – Profundidade de Corte (A_p).

O diâmetro efetivo de corte para uma fresa de topo esférico depende não só do diâmetro da fresa utilizado, mas também da profundidade de corte definida para a operação, conforme está representado na figura 1.24.

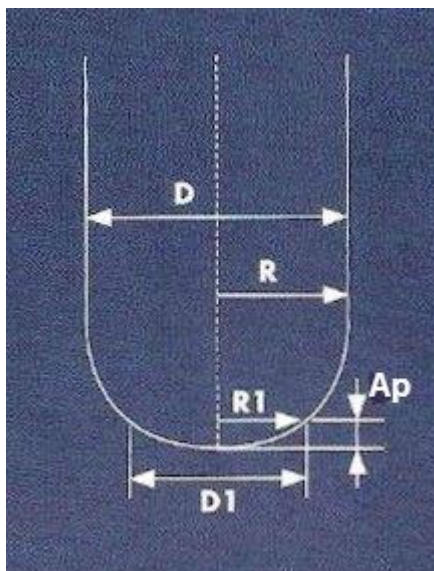


Figura 1.24 – Diâmetro efetivo de corte numa ferramenta de topo esférico.

Observando a figura anterior e aplicando-se a equação seguinte, é possível determinar o raio efetivo de corte.

$$R_1 = \sqrt{A_p \times (2R - A_p)} \quad (1.2)$$

Sendo:

R_1 – Raio efetivo de corte [mm]

R – Raio da ferramenta [mm]

D_1 – Diâmetro efetivo de corte [mm]

D – Diâmetro da ferramenta [mm]

A_p – Profundidade de corte [mm]

Desta forma e aplicando-se a equação (1.6) ($n = V_c \times 1000 / (\pi \times d)$), o valor da velocidade de rotação (n) obtido considerando o diâmetro efetivo de corte em lugar do diâmetro da ferramenta é consideravelmente maior, já que na grande maioria das situações $D_1 < D$.

Alguns fabricantes indicam o diâmetro efetivo de acordo com a geometria que se encontra a maquinar, como podemos constatar pela figura seguinte:

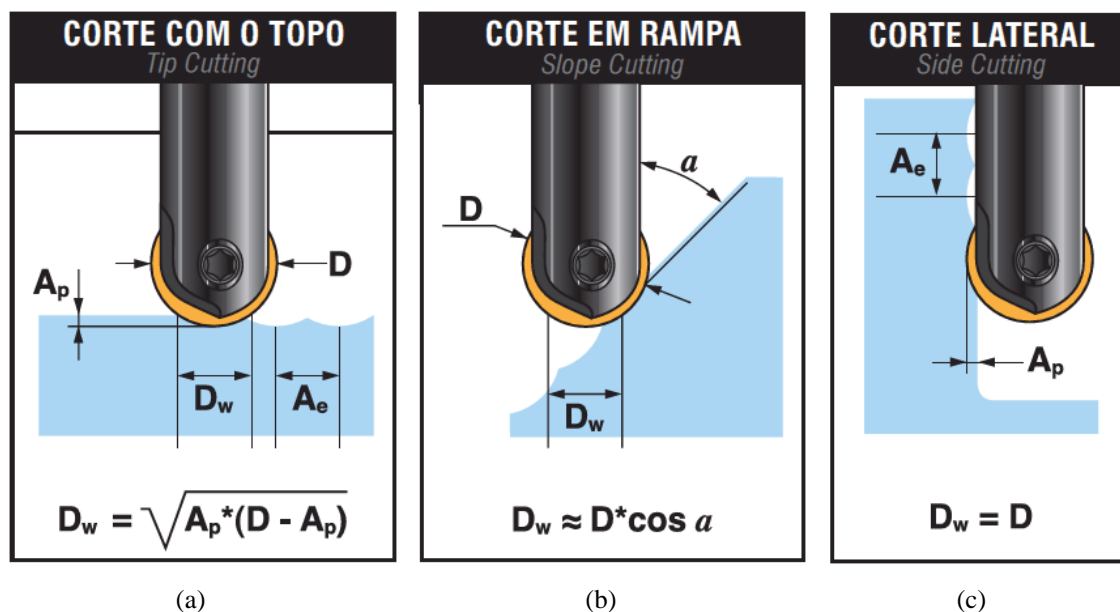


Figura 1.25 – Diâmetro efetivo de corte numa ferramenta de topo esférico consoante a geometria a maquinar: Corte com o topo (a); Corte em Rampa (b); Corte Lateral (c) (Alltech-Tools, n.d.).

A fórmula do fabricante para determinação do diâmetro efetivo fresando através do topo (figura 1.25 – a), é idêntica à da equação 1.2, apenas utilizando o fabricante uma nomenclatura diferente, no entanto pode-se constatar que quando a maquinagem se dá em rampa ou lateralmente, os diâmetros efetivos são significativamente elevados, utilizando-se neste caso de velocidades de rotação [rpm] relativamente mais baixas.

A tabela 1.3 representa o extrato de uma tabela de um fabricante de ferramentas, o qual apresenta os valores do diâmetro efetivo de corte já calculados tendo em consideração as variáveis intervenientes.

Tabela 1.3 – Valores dos diâmetros efetivos (De) [mm] considerando fresagem de topo.

ØD	Ap																	
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	7
6	1,5	2,2	2,6	3	3,3	3,6	3,9	4,1	4,3	4,5	5,2	5,7	5,9	6,0	-	-	-	-
8	1,8	2,5	3	3,5	3,9	4,2	4,5	4,8	5,1	5,3	6,2	6,9	7,4	7,7	-	-	-	-
10	2	2,5	3,4	3,9	4,4	4,7	5,1	5,4	5,7	6,0	7,1	8,0	8,7	9,2	9,5	-	-	-
12	2,2	3,1	3,7	4,3	4,8	5,2	5,6	6,0	6,3	6,6	7,9	8,9	9,7	10,4	10,9	11,3	11,8	-
14	2,4	3,3	4,1	4,7	5,2	5,7	6,1	6,5	6,9	7,2	8,7	9,8	10,7	11,5	12,1	12,6	13,4	13,9
16	2,5	3,6	4,3	5	5,6	6,1	6,5	7,0	7,4	7,7	9,3	10,6	11,6	12,5	13,2	13,9	14,8	15,5
20	2,8	4	4,9	5,6	6,2	6,8	7,4	7,8	8,8	8,7	10,5	12,0	13,2	14,3	15,2	16,0	17,3	18,3
25	-	4,5	5,4	6,3	7,0	7,7	8,2	8,8	9,3	9,8	11,9	13,6	15,0	16,2	17,3	18,3	20,0	21,4
30	-	-	6	6,9	7,7	8,4	9,1	9,7	10,2	10,8	13,1	15,0	16,6	18,0	19,3	20,4	22,4	24,0
32	-	-	-	7,1	7,9	8,7	9,4	10,0	10,6	11,1	13,5	15,5	17,2	18,7	20	21,2	23,2	25,0

1.2.3.4. FLEXÃO DA FERRAMENTA

A diferença entre a geometria projetada e a peça obtida após a maquinagem pode ser causada por diferentes situações, como: rigidez da estrutura da máquina-ferramenta, algoritmos de comando do CNC, características do processo de corte, flexão da ferramenta devido à força de maquinagem, entre outras.

Neste estudo é analisado o desvio da forma da peça devido à flexão da ferramenta, pois este é o fator que representa um erro dimensional significativo na maquinagem de peças como moldes e matrizes, devido à frequente necessidade de se utilizar ferramentas com excessivo comprimento.

Conforme recomendado pelos fabricantes de ferramentas de corte, pode-se estimar a flexão da ferramenta utilizando princípios de resistência dos materiais, considerando a ferramenta como uma viga encastrada sob a ação de uma força radial (F), decorrente do processo de corte (figura 1.26).

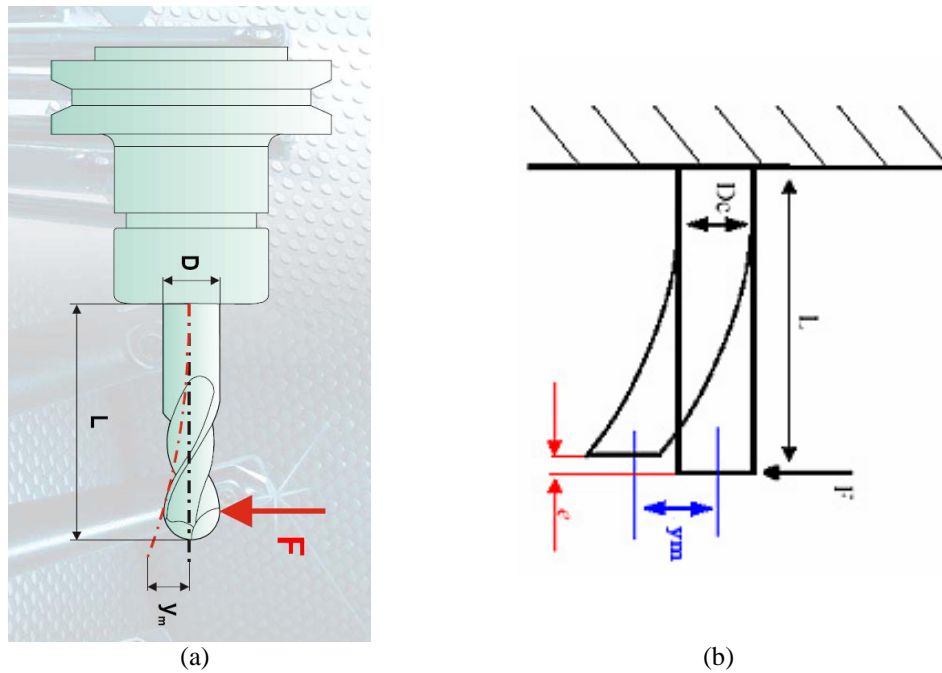


Figura 1.26 – Flexão da Ferramenta: Representação da flexão da ferramenta (a); Representação da flexão como um sistema encastrado (b).

A estimativa desta deformação é obtida pela equação 1.3 (Sandvik, 2000):

$$y_m = \frac{F \times L^3}{3 \times E \times I} \quad (1.3)$$

Sendo:

y_m - Flexão da Ferramenta [mm];

e - Erro Dimensional [mm];

F - Força Radial [N];

L - Comprimento da Ferramenta [mm];

E - Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young [N/mm²];

I - Momento de inércia de uma geometria cilíndrica [mm⁴].

$$I = \frac{\pi \times D_c^4}{64} \quad (1.4)$$

Sendo:

D_c – Diâmetro da secção cilíndrica [mm].

Pela combinação de ambas as equações é evidente que o Comprimento da Ferramenta (L) tem fator exponencial 3 e o diâmetro (D_c) tem fator exponencial 4, que por sua vez influenciam diretamente no desvio da haste da ferramenta.

Ou seja, o desvio será tanto maior quanto maior for o comprimento da haste e quanto menor for o diâmetro da ferramenta de corte.

$$y_m = K \times \frac{L^3}{D_c^4} \quad (1.5)$$

Concluimos que devemos então usar as ferramentas de maior diâmetro possível com uma montagem o mais curta possível, apesar de que desta forma restringimos a maquinação HSC quando tentamos maquinar cavidades estreitas e profundas.

Como o metal duro apresenta um Módulo de Elasticidade (E) maior do que o aço rápido (210 kN/mm² do aço rápido contra 696 kN/mm² do metal duro), as ferramentas com hastes de metal duro apresentam uma menor flexão.

Reduzir as vibrações no corte faz com que existam menores erros de forma na peça e podemos consegui-lo através da diminuição do comprimento da fresa, através da montagem conforme citado acima, por outro lado combinar a geometria da ferramenta, com parâmetros de corte apropriados, permitem manter estes erros dentro de limites aceitáveis.

1.2.4. PARÂMETROS DE CORTE

1.2.4.1. PARÂMETROS DE CORTE

Os parâmetros de corte de uma operação de fresagem são: **velocidade de rotação, velocidade de avanço, profundidade de corte e largura de corte** (Relvas, 2002):

- a) **Velocidade de Rotação** – É a velocidade angular da fresa em rotações por minuto, dependendo este valor da velocidade de corte estabelecida para determinada operação. A velocidade de corte corresponde à velocidade linear de um ponto na periferia da fresa e estabelece a velocidade a que se pode cortar o material.
- b) **Velocidade de Avanço** – Velocidade de deslocamento da fresa sobre a peça e define a espessura da aparta, sendo o seu valor expresso em milímetros por minuto ou milímetros por rotação. Em conjunto com a velocidade de rotação são os dois fatores que mais influenciam a vida útil da ferramenta.

- c) **Profundidade de Corte (ou penetramento axial)** – Dimensão ou altura de penetração da fresa no material da peça. Este valor permite determinar a altura da apra que conjuntamente com a espessura da mesma estabelece o valor da secção desta.
- d) **Largura de Corte (ou penetramento radial)** – Dimensão ou altura de atuação da fresa durante o corte, sendo calculada relativamente ao diâmetro da fresa em valores que vão normalmente desde os 50% a 90% do diâmetro da mesma.

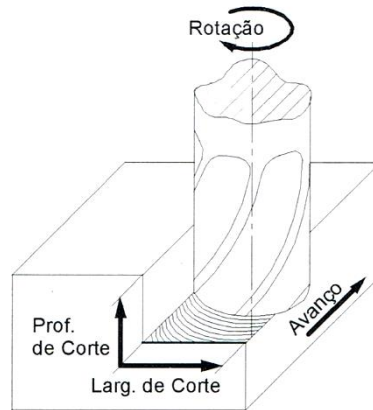


Figura 1.27 – Representação dos parâmetros de corte em fresagem frontal (Relvas, 2002).

1.2.4.2. CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE CORTE

- a) **Velocidade de Rotação (n) e Velocidade de Corte (V_c)** – A velocidade de corte influencia a velocidade de rotação, sendo a primeira estabelecida pelo fabricante da ferramenta. A seleção da velocidade de corte deve ter como objetivo principal uma maior longevidade da vida útil, devendo esta ser calculada para que, para as mesmas condições de corte a ferramenta dure o maior período de tempo possível. A velocidade de corte é o parâmetro que tem maior influência na vida útil de uma ferramenta.

A velocidade de rotação da fresa pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad (1.6)$$

Sendo:

n – velocidade de rotação [rpm];

V_c – Velocidade de corte [m/min];

D – Diâmetro da fresa [mm].

- b) **Velocidade de avanço (f)** – Esta é a velocidade de deslocamento da ferramenta segundo o plano XY e está relacionado com o número de arestas da fresa (z), o avanço por aresta (fz) e a velocidade de rotação da fresa (n).

$$f = f_z \times z \times n \quad (1.7)$$

Sendo:

f – Vel. de avanço da mesa no plano XY [mm/min];

f_z – Avanço por gume [mm];

z – Número de gumes de corte da fresa;

n – Vel. de rotação da fresa [rpm].

Para o caso da fresagem utilizando ferramentas de metal duro (WC) pode ser utilizada a tabela 1.4 de velocidade de corte (V_c) onde obtemos o Avanço por gume de acordo com o diâmetro (f_z).

Tabela 1.4 – Velocidade de Corte (V_c) e Avanço por Gume de Corte (f_z) para Fresagem.

Material	Cutting speed V_c - m/min	FEED PER TOOTH ACCORDING TO DIAMETER							Coolants
		$\varnothing 2$	$\varnothing 5$	$\varnothing 8$	$\varnothing 10$	$\varnothing 12$	$\varnothing 16$	$\varnothing 20$	
Steel up to 500 N/mm ²	80-90	0,02	0,04	0,06	0,08	0,08	0,10	0,10	emulsion
Alloy steel over 500 N/mm ²	50-60	0,01	0,02	0,04	0,04	0,05	0,08	0,08	emulsion
Tool steel	40-50	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	oil
Hardened steel	40-50	0,01	0,05	0,020	0,025	0,025	0,030	0,05	oil
Spring steel	40-50	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	oil
Cr-Ni steel - Stainless steel	30-40	0,01	0,015	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	emulsion
Alloy steel special alloys	20-40	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,03	0,04	oil emulsion
Semisteel cast iron	50-70	0,01	0,02	0,03	0,05	0,08	0,10	0,12	emulsion
Cast iron up to 200 HB	60-70	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,15	dry/emulsion
Cast iron over 200 HB	50-70	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,8	0,10	dry/emulsion
Cast iron up to 500 HB	40-50	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	dry/emulsion
Cast iron over 500 HB	40-50	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	dry/emulsion
Copper / bronze / brass	100-120	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,15	emulsion
Aluminium alloys up to 11% Si	80-100	0,03	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,15	emulsion
Aluminium alloys over 11% Si	80-100	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	emulsion
Titanium and titanium alloys	20-30	0,01	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	emulsion
Plastic materials									
Thermosetting	150-200	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	dry
Epoxy resin and reinforced fibers	120-150	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	dry

A velocidade de avanço segundo o eixo Z pode ser determinada pela equação 1.8. A velocidade de avanço desta forma calculada é bastante conservadora, pois reduz em 50% a velocidade definida para o plano XY. Na literatura encontram-se outras sugestões (valores na ordem dos 70 a 80% da velocidade de avanço no plano XY, principalmente quando a entrada da ferramenta é feita com movimento helicoidal ou em rampa.

$$P = 0,5 \times f \quad (1.8)$$

Sendo:

P - Velocidade de avanço da ferramenta no eixo Z [mm/min].

- c) **Profundidade de Corte** – Deve-se escolher a maior profundidade de corte possível já que para um determinado avanço, maior é o volume de material removido, sendo assim benéfico do ponto de vista económico já que se consegue aproveitar um maior comprimento da aresta de corte da fresa.

Segundo Relvas (2002), a diminuição progressiva da potência das máquinas e a evolução da tecnologia de controlo de deslocamentos, tem levado a que hoje seja corrente optar-se por grandes avanços em detrimento de grandes profundidades de corte.

Para o caso de se pretender determinar os parâmetros de corte de uma operação de furação com broca, em relação à velocidade de rotação (n) e de corte (Vc) não há muito a acrescentar, já que são calculados exatamente da mesma forma do que na fresagem, utiliza-se para o efeito uma tabela idêntica mas com valores adaptados à operação de furação. Neste caso, é de realçar, que o cálculo do avanço da broca (equação 1.9) é definido a partir do avanço em milímetros por rotação (mm/r) recomendado (tabela 1.5).

Tabela 1.5 – Velocidade de Corte (Vc) e Avanço por Rotação (fr) para Furação.

Material	Cutting speed Vc - m/min	FEED PER TURN ACCORDING TO DIAMETER mm/r							Coolants
		2	5	8	10	12	16	20	
Steel up to 500 N/mm ²	80-100	0,02	0,04	0,06	0,10	0,12	0,14	0,16	emulsion
Alloy steel over 500N/mm ²	70-90	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	emulsion
Tool steel	20-40	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	oil emulsion
Hardened steel	10-30	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	oil emulsion
Spring steel	20-50	0,01	0,03	0,04	0,05	0,08	0,08	0,1	oil emulsion
Cr-Ni steel	20-40	0,01	0,02	0,06	0,08	0,10	0,10	0,12	oil
Stainless steel	40-60	0,02	0,04	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	oil
Alloy steel special alloys	20-40	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	oil emulsion
Semisteel cast iron	40-50	0,02	0,04	0,08	0,10	0,12	0,12	0,16	oil emulsion
Cast iron up to 200 HB	50-60	0,02	0,04	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	emulsion
Cast iron over 200 HB	40-50	0,02	0,04	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	emulsion
Cast iron up to 500 HB	20-25	0,02	0,04	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	emulsion
Cast iron over 500 HB	15-30	0,02	0,04	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	emulsion
Copper	80-110	0,02	0,05	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	emulsion
Bronze	100-120	0,02	0,05	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	emulsion
Aluminium alloys up to 11% Si	100-140	0,04	0,08	0,10	0,12	0,16	0,18	0,20	emulsion
Aluminium alloys over 11% Si	60-100	0,02	0,04	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	emulsion
Brass	80-110	0,02	0,04	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	emulsion
Titanium and titanium alloy	20-40	0,01	0,03	0,05	0,06	0,08	0,08	0,1	emulsioe
Magnesium alloys	100-150	0,04	0,08	0,10	0,12	0,16	0,2	0,25	dry
Plastic materials thermosetting	60-100	0,04	0,08	0,10	0,12	0,16	0,2	0,25	air
Laminates and thermoplastics	80-150	0,05	0,08	0,1	0,15	0,20	0,25	0,3	air
Epoxy resin and reinforced fibers	60-100	0,04	0,08	0,10	0,12	0,16	0,2	0,4	air

A **Velocidade de Avanço (com broca)** determina-se através da seguinte expressão:

$$V_f = f_r \times n \quad (1.9)$$

Sendo:

V_f - Velocidade de avanço [mm/min];

f_r – Avanço por rotação [mm/rot].

1.2.5. MAQUINAGEM CONCORDANTE E DISCORDANTE

A fresagem pode ser classificada segundo o sentido de remoção de material, conforme o sentido de movimentação entre a ferramenta e a peça:

- Sentido de corte concordante – A maior espessura da aparta encontra-se no início do corte (*climb cutting*) (figura 1.28a).

- Sentido de corte discordante – A maior espessura da aparta encontra-se no final do corte (*conventional cutting*) (figura 1.28b).

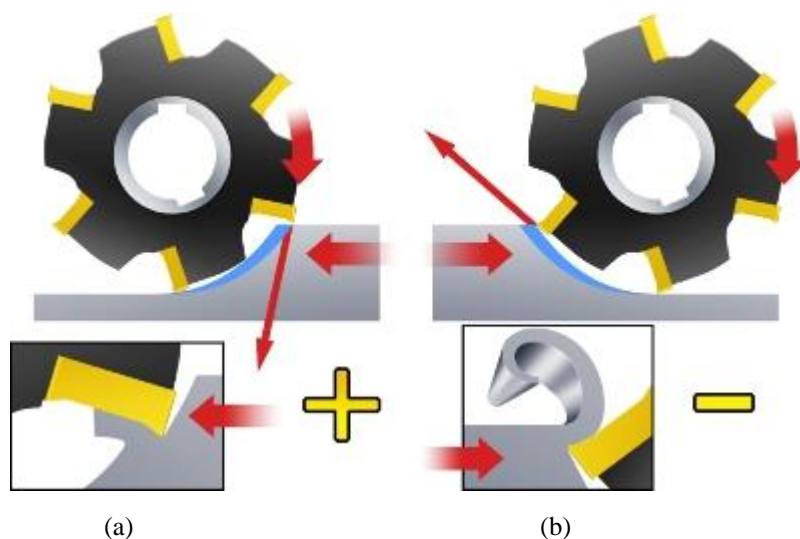


Figura 1.28 – Maquinagem concordante e discordante: Corte Concordante (*Climb milling*) (a); Corte Discordante (*Conventional milling*) (b).

Na tabela 1.6 são apresentadas as principais vantagens e desvantagens do corte concordante e discordante. Na figura 1.29 e 1.30 é apresentado de forma esquemática o corte concordante e discordante para o caso de um contorno exterior e um contorno interior.

Tabela 1.6 - Vantagens e desvantagens do corte concordante e discordante (Adaptado de HITACHI-TOOLS®, n.d.)

	Corte concordante	Corte discordante
Forças de corte	Estão direcionadas no sentido da peça	Estão direcionadas no sentido oposto à peça.
Espessura da limalha	Diminui	Aumenta
Calor	Eficiência na dissipação do calor para a limalha.	É transferido para a peça aumentando o desgaste da ferramenta.
Desgaste da Ferramenta	É baixo	Extremamente elevado, pois ao longo do corte há um aumento da espessura da limalha, e consequente aumento de tensões de corte aquando da libertação da limalha.
Vida útil da ferramenta	Quadruplica. Deve-se à eficiente remoção da limalha, prevenindo o seu contacto com as arestas de corte da ferramenta e consequente quebra.	Reduz. A limalha é projetada no sentido de corte da ferramenta, sendo pressionada entre a ferramenta e a peça. Remaquinando-a, provoca a quebra da zona de corte e exerce forças de flexão na ferramenta.

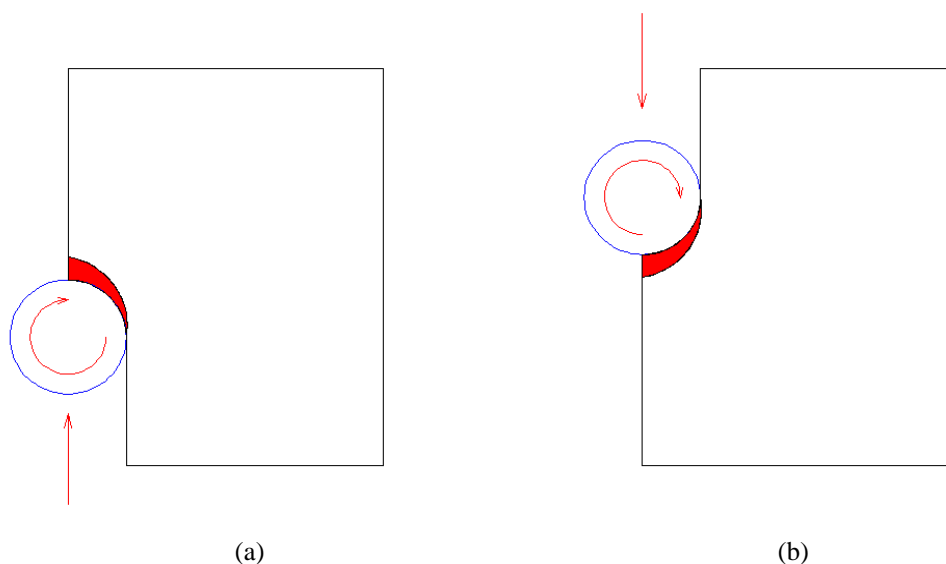


Figura 1.29 – Contorno exterior: Maquinagem Concordante (a); Maquinagem Discordante (b).

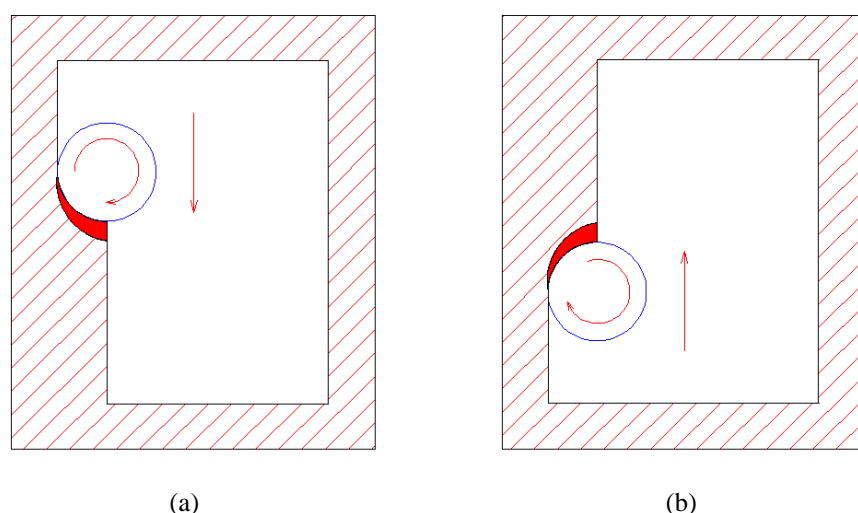


Figura 1.30 – Contorno interior: Maquinagem Concordante (a); Maquinagem Discordante (b).

A fresagem concordante é a primeira escolha para a maioria das operações. Em alguns casos, quando a máquina não tiver potência suficiente ou quando a peça for muito maleável, o fresamento discordante é recomendado. Porém dever-se-á ter em consideração que a força de corte tende a levantar a peça durante o fresamento discordante. Isto deve ser cuidadosamente considerado quando se fixa a peça (Sandvik – Coromant, n.d.).

1.2.6. MAQUINAGEM COM FRESAS DE TOPO ESFÉRICO

Quando são utilizadas fresas de topo esférico, constata-se que na maior parte das vezes, se não forem respeitados alguns parâmetros, obtêm-se superfícies significativamente mais rugosas do que aquelas que se previa.

A figura seguinte ilustra o excedente de material deixado por uma ferramenta esférica de raio R em função da Sobreposição entre Passagens (*Stepover*) (a_e).

Esta sobra de material é conhecida como Altura da Crista (*Scallop height*) (h), conforme já foi mencionado no Capítulo 1.2.3.3.

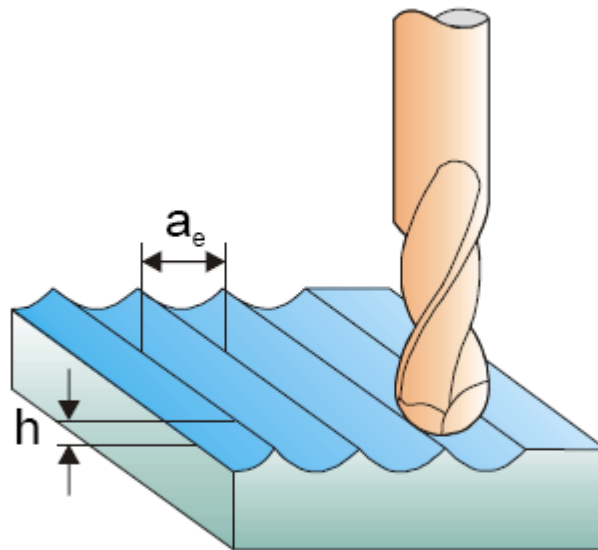


Figura 1.31 – Altura da Crista

A Altura da Crista pode ser calculada através da equação 1.10:

$$a_e = \left(\sqrt{R^2 - (R-h)^2} \right) \times 2 \Rightarrow h = \left(\sqrt{R^2 - \left(\frac{a_e}{2} \right)^2} \right) - R \quad (1.10)$$

Sendo:

a_e – Sobreposição entre passagens (*Stepover*) [mm];

h – Altura da Crista (*Scallop height*) [mm];

R – Raio da Ferramenta [mm].

Ferraresi (1977), utilizou a equação seguinte para simplificar o cálculo da Altura da Crista para operações de torneamento. Cebalo (1999), extrapolou esta equação para encontrar o valor da altura da crista em operações de fresagem:

$$h = f(a_e, R) \cong \frac{a_e^2}{8.R} \quad (1.11)$$

Sendo:

a_e – Sobreposição entre passagens (*Stepover*) [mm];

h – Altura da Crista (*Scallop height*) [mm];

R – Raio da Ferramenta [mm].

Apesar da relação fornecida anteriormente ser útil em muitos casos, o Programador CAD-CAM poderá “guiar-se” pela tabela seguinte, onde possui a vermelho os valores da altura da crista para um acabamento de muito alta qualidade, a branco os valores mais usuais e com uma boa qualidade, e a verde valores para um acabamento mais “grosseiro”.

Tabela 1.7 – Valores da Altura da Crista (*Scallop height*) em milímetros.

(mm)

Ae \ R	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,8	1
0,5	0,0006	0,0025	0,0057	0,0101	0,0159	0,0230	0,0417	0,0670	0,2000	0,5000
1,0	0,0003	0,0013	0,0028	0,0050	0,0078	0,0113	0,0202	0,0318	0,0835	0,1340
1,5	0,0002	0,0008	0,0019	0,0033	0,0052	0,0075	0,0134	0,0210	0,0543	0,0858
2,0	0,0002	0,0006	0,0014	0,0025	0,0039	0,0056	0,0100	0,0157	0,0404	0,0635
2,5	0,0001	0,0005	0,0011	0,0020	0,0031	0,0045	0,0080	0,0125	0,0322	0,0505
3,0	0,0001	0,0004	0,0009	0,0017	0,0026	0,0038	0,0067	0,0104	0,0268	0,0420
4,0	0,0001	0,0003	0,0007	0,0013	0,0020	0,0028	0,0050	0,0078	0,0201	0,0314
5,0	0,0001	0,0003	0,0006	0,0010	0,0016	0,0023	0,0040	0,0063	0,0160	0,0251
6,0	0,0001	0,0002	0,0005	0,0008	0,0013	0,0019	0,0033	0,0052	0,0133	0,0209
8,0	0,0000	0,0002	0,0004	0,0006	0,0010	0,0014	0,0025	0,0039	0,0100	0,0156
10,0	0,0000	0,0001	0,0003	0,0005	0,0008	0,0011	0,0020	0,0031	0,0080	0,0125
12,5	0,0000	0,0001	0,0002	0,0004	0,0006	0,0009	0,0016	0,0025	0,0064	0,0100
15,0	0,0000	0,0001	0,0002	0,0003	0,0005	0,0008	0,0013	0,0021	0,0053	0,0083
16,0	0,0000	0,0001	0,0002	0,0003	0,0005	0,0007	0,0013	0,0020	0,0050	0,0078

1.2.7. CONDIÇÃO DE CONTACTO FERRAMENTA - PEÇA

Ao contrário da fresagem convencional de geometrias simples, na maquinagem de formas complexas, em que o acabamento é na maior parte dos casos realizada com fresas de topo esférico, o contacto da ferramenta com a peça altera-se constantemente. Desta forma os parâmetros de corte possuem características específicas e muitas das vezes na indústria, os

fresadores CNC vêm-se obrigados a reduzir manualmente as velocidades de avanço e rotação da ferramenta de corte, evitando desta forma situações indesejadas.

Para se compreender melhor o processo de fresagem de geometrias complexas, é importante realizar-se uma análise do contacto da ferramenta com a peça, verificando as dificuldades do processo. A figura 1.32 ilustra o material remanescente deixado por uma operação de desbaste numa geometria, utilizando uma ferramenta de topo plano e uma ferramenta de topo esférico.

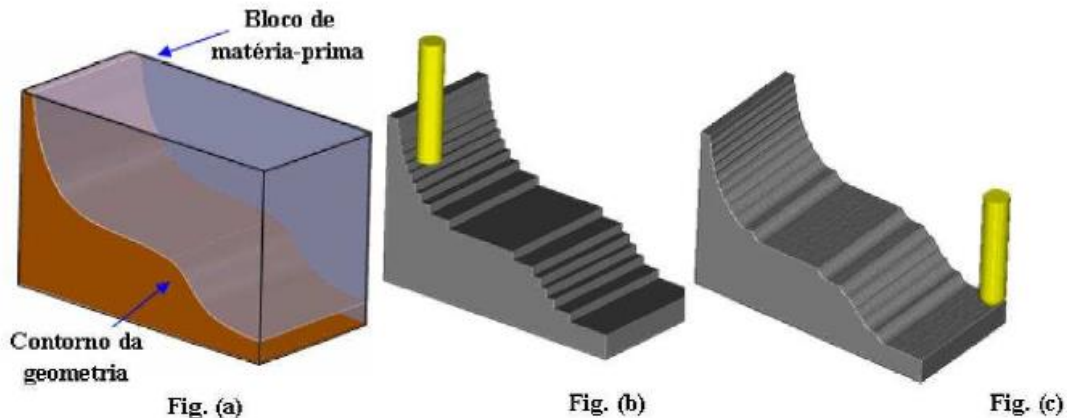


Figura 1.32 – Desbaste por ferramentas de topo plano e esférico (Souza *et al*, 2010).

Observa-se que a ferramenta esférica se aproxima mais da geometria final da peça, deixando um aspeto mais uniforme para o acabamento, em contrapartida requer mais tempo para desbaste.

As fresas de topo plano com raio nas extremidades são cada vez mais utilizadas neste tipo de aplicações.

Souza *et al.* (2010), realizaram um estudo utilizando *software* de simulação, para quantificar o material remanescente numa geometria plana com determinada inclinação, usando um ciclo de desbaste com uma ferramenta de topo plano e com uma ferramenta de topo esférico, como mostra a figura 1.33.

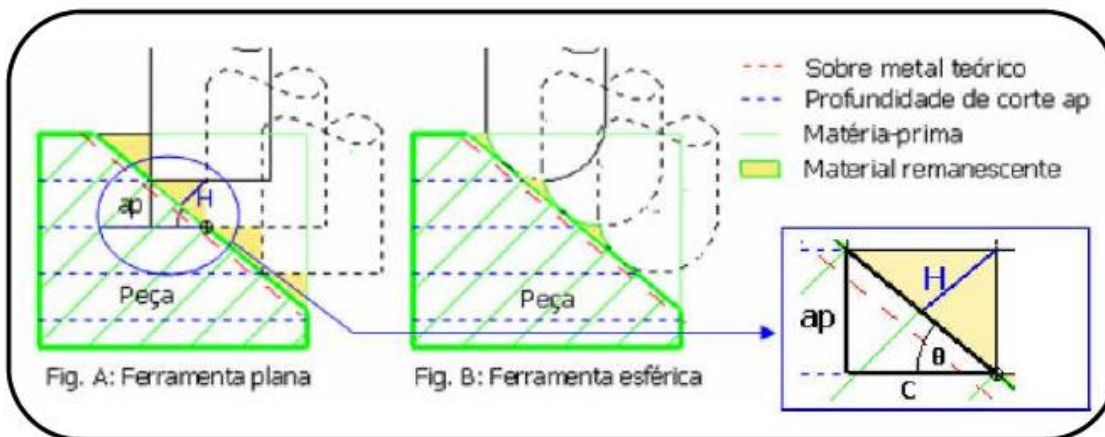


Figura 1.33 – Material remanescente da operação de desbaste (Souza *et al*, 2010).

A figura 1.33 – a, ilustra a operação realizada com uma ferramenta de topo plano e a figura 1.34 - b, utilizando uma ferramenta de topo esférico. As simulações realizadas em *software* CAD pelos autores, demonstram que a ferramenta de ponta esférica deixa um volume de material remanescente 80% menor quando comparado com o volume deixado pela ferramenta de topo plano.

No desenho de pormenor (figura 1.33 – c), observa-se que, trigonometricamente, define-se a fórmula da área do material remanescente (A_r) e a fórmula do comprimento máximo da secção transversal de corte (H), em função da profundidade de corte (a_p), e da inclinação da superfície (θ), demonstrados pelas equações seguintes.

$$A_r = \frac{A_p^2}{2.Tan(\theta)} \quad (1.12)$$

$$H = A_p . \cos(\theta) \quad (1.13)$$

Sendo:

A_r : Área do material remanescente [mm²];

A_p : Profundidade de corte [mm];

H : Comprimento da secção da transversal de material remanescente [mm].

De acordo com Shulz e Finzer (1999), para se ter um processo de corte a alta velocidade eficiente (HSC - *High Speed Cutting*), a ferramenta de corte deve permanecer em carregamento e contacto com o material de maneira constante, mantendo tão estável quanto possível a força de maquinagem. Para isto, a secção de corte deve-se manter o mais constante possível durante todo o percurso da ferramenta.

Em alguns casos, no processo de fresagem, a inclinação das superfícies modifica-se constantemente. A etapa de acabamento é realizada com uma ferramenta de topo esférico e, durante o processo, vai variando o ponto de contato na superfície e o diâmetro efetivo. Dependendo da curvatura da superfície, a forma da apara altera-se constantemente, devido à posição de contato da ferramenta com a peça. A figura 1.34 mostra as variações do ponto de contato numa passagem da ferramenta pela peça em passes paralelos (Souza *et al*, 2004).

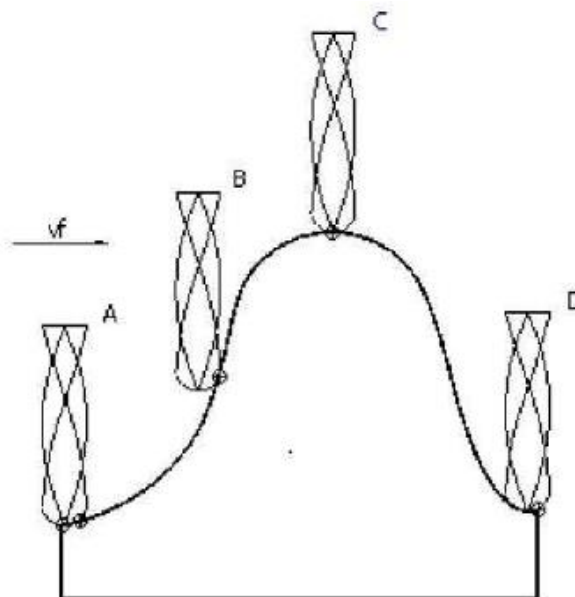


Figura 1.34 – Pontos de Contacto de uma Ferramenta de Ponta Esférica (Souza et al, 2010).

Na figura 1.34, na posição A, nota-se que a extremidade central da ferramenta está no corte, nesta o diâmetro efetivo de corte é nula, logo, a velocidade de corte é zero, quando a profundidade axial for igual a zero.

Acompanhando o sentido de maquinagem até à posição D, a ferramenta oscila entre o sentido de corte ascendente, de A para C e sentido descendente de C para D. No ponto C, a ferramenta está em contacto com a peça apenas no centro, e na posição B a ferramenta utiliza a sua periferia para o corte.

2. SISTEMAS CAD-CAM

2.1. SISTEMAS CAD

2.1.1. INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS CAD

O termo CAD que deriva do Inglês *Computer Aided Design* e que significa em Português Projeto Assistido por Computador, foi utilizado pela primeira vez no início dos anos 60 pelo investigador do Massachusettes Institute of technology (M.I.T), Ivan Sutherland. O termo CAD pode ser definido como sendo o processo de projeto que utiliza técnicas gráficas computadorizadas, através da utilização de programas (*software*) de apoio, auxiliando na resolução dos problemas associados ao projeto.

Estes sistemas fornecem uma série de ferramentas para construção de entidades geométricas planas (como linhas, curvas, polígonos) ou mesmo objetos tridimensionais (cubos, esferas, etc.). Também disponibilizam ferramentas para relacionar essas entidades ou esses objetos, por exemplo: criar um arredondamento entre duas linhas ou subtrair as formas de dois objetos tridimensionais para obter um terceiro.

Segundo Souza *et al.* (2009), existem alguns autores, que classificam os sistemas CAD comerciais empregando três categorias:

- a) Sistemas CAD de pequeno porte (*low-end*);
- b) Sistemas CAD de médio porte (*middle-end*);
- c) Sistemas CAD de grande porte (*high-end*).

2.1.2. SISTEMAS DE PEQUENO PORTE

De uma forma resumida os sistemas CAD de pequeno porte são utilizados para representar objetos e formas geométricas em duas dimensões e foi o início desta tecnologia. Num sistema CAD de pequeno porte, o utilizador deve utilizar geometrias como retas, círculos e curvas para construir as vistas de um produto (figura 2.1).

Segundo Foggiato (2008), os sistemas CAD 2D foram projetados para suprir a deficiência existente no desenho manual, que era um processo moroso e de difícil reaproveitamento de dados.

Alguns exemplos de *software* CAD 2D, ou seja de pequeno porte são o *QCAD RibbonSoft*, o *Unicad Uniopen Software* e o *Autocad Autodesk* que embora possua alguns recursos de modelamento a 3D, a principal utilização deste software é o desenho 2D.

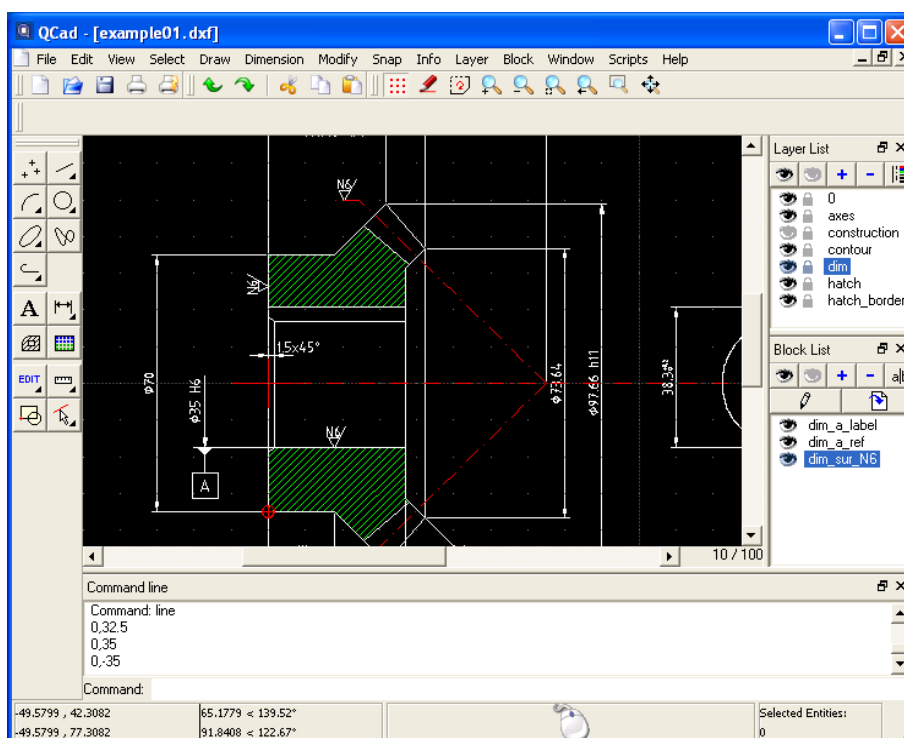


Figura 2.1 – Desenho Técnico desenvolvido em *software* CAD de pequeno porte.

2.1.3. SISTEMAS DE MÉDIO PORTE

Os sistemas CAD de médio porte têm como principal característica a capacidade de representação geométrica de três dimensões, de forma realística e não por vistas e perspectivas. Este recurso possibilita fornecer informações geométricas para além de figuras geométricas como círculos, retas, curvas, etc., como nos sistemas 2D. Este tipo de *software* pode gerar objetos com informações superficiais e características mecânicas como o centro de gravidade e volume.

Estes sistemas CAD de médio porte não são habitualmente integrados com outros sistemas computacionais como CAM ou CAE, são sistemas denominados “*stand-alone*”, ou seja, apenas com um módulo de trabalho. Contudo, as geometrias tridimensionais criadas num CAD de médio porte podem ser transferidas a outros CAX, onde x representa as diferentes etapas de engenharia, auxiliadas por computador (*CA-Computer Aided*). Esta pode ser considerada a classe dos sistemas CAD que mais se tem desenvolvido nos últimos anos, são sistemas de modelamento tridimensional, independentes de outros módulos e que permitem a comunicação com os demais CAX.

Souza *et al.* (2009), classifica os sistemas CAD desta classe quanto às suas características de modelamento, em paramétricas e associativas.

Os sistemas CAD paramétricos podem ser divididos de duas formas, parametrização dimensional e entre geometrias.

A parametrização dimensional permite que todas as dimensões de um produto estejam relacionadas entre si, através de parâmetros e se se altera o valor de um parâmetro, todos os valores relacionados com este último alteram-se também.

Além da parametrização de dimensões geométricas, muitos sistemas CAD permitem a inclusão de atributos associados a cada entidade construída, conhecidos por constrangimentos. Esses atributos garantem diferentes condições entre as entidades, como manter o paralelismo, a perpendicularidade, a tangência, semelhança de dimensões, entre outras possibilidades.

A parametrização entre geometrias é independente de valores numéricos, operações algébricas e restrições de construção, na parametrização entre geometrias, o *software* CAD cria relações entre as geometrias construídas, as alterações realizadas numa região do modelo podem repercutir nas regiões adjacentes, que sofrem influência da região alterada. Estes sistemas, em geral, possuem um histórico das etapas realizadas na construção de um produto, que é conhecido como árvore binária, ou árvore de construção topológica e as alterações geométricas podem ser realizadas pela referida árvore (figura 2.2).

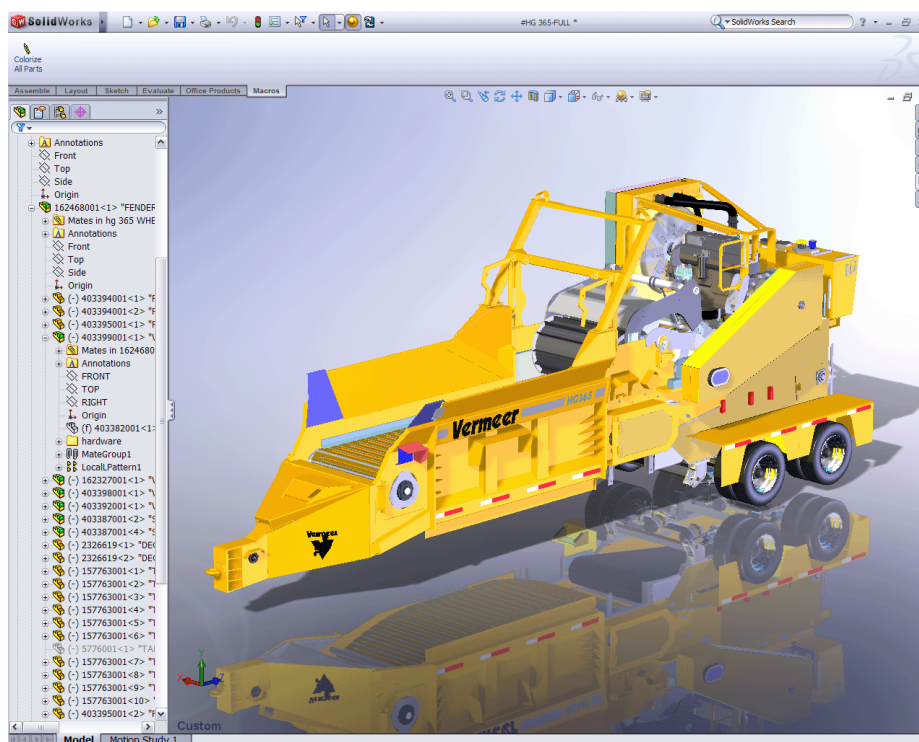


Figura 2.2 – Desenho 3D desenvolvido em Solid-Works (Árvore binária à esquerda).

Existem sistemas CAD modeladores de sólidos que permitem a criação de objetos tridimensionais de forma rápida e simples, mas em contrapartida não permitem recursos avançados para modelamento de formas geométricas complexas. Segundo Silva (2006), um modelo sólido pode ser importado por um sistema CAM e rapidamente analisado através de algoritmos de reconhecimento de características. São exemplos de sistemas CAD de médio porte modeladores de sólidos, o *Solidedge*, *Solid Works* e o *Topsolid*.

Os sistemas CAD modeladores de superfícies permitem a criação mais apurada de formas complexas, com recursos interativos para manipulação da forma geométrica desejada, podendo manter a continuidade de curvatura da geometria, estes utilizam formulações matemáticas mais complexas. De acordo com Rutkauskas (2005), este tipo de modelamento, geralmente não é paramétrico, ou seja, conforme referido anteriormente, não é possível alterar a peça apenas modificando um parâmetro ou uma determinada medida da peça.

Estes sistemas requerem utilizadores mais experientes do que para os CAD modeladores de sólidos, assim como maior tempo de trabalho. São exemplos de sistemas CAD de médio porte modeladores de superfícies, o *Powershape*, o *Cimatron* e o *Alias*.

2.1.4. SISTEMAS DE GRANDE PORTE

De uma maneira geral, estes sistemas são compostos por vários módulos dentro do mesmo *software* e podem envolver CAD, CAM, CAI, CAE, etc. O utilizador realiza o modelamento do produto no módulo CAD, posteriormente solicita a alteração para o módulo CAM, por exemplo. Nesta etapa, o *software* não permite alterações geométricas no modelo, apenas disponibiliza as ferramentas existentes no CAM.

Este tipo de *software* para além de conter diferentes sistemas CAX integrados, possuem também sub-módulos de trabalho dentro do mesmo CAX, por exemplo o módulo CAM pode possuir sub-módulos como programação CNC para torneamento, programação para fresamento três eixos, fresamento cinco eixos e eletroerosão.

Este tipo de *software* possui o modelamento híbrido, ou seja permite trabalhar com modelos sólidos e de superfícies ao mesmo tempo dentro de um mesmo ambiente.

Souza *et al.* (2009), afirma que os sistemas CAD de grande porte (*high end*) são desenvolvidos e utilizados por empresas, como a *General Motors* que desenvolveu o *software* Unigraphics que atualmente é denominado NX e comercializado pela Siemens PLM, a IBM é a proprietária do *software* Catia, a PTC desenvolveu o ProEngineer, entre outros.

2.2. MÁQUINAS E PROGRAMAÇÃO CNC

As máquinas-ferramenta convencionais como, tornos mecânicos, fresadoras e retificadoras começam a fazer parte do passado.

Desde o fabrico da máquina convencional, com os seus movimentos totalmente dependentes do operador, até às máquinas de controlo numérico computadorizado (CNC - *Computer Numeric Control*) de alta velocidade, sem necessidade da presença do operador, o caminho percorrido foi imenso.

Segundo Completo *et al.* (2009), antigamente era corrente afirmar que o controlo numérico computadorizado não poderia ser rentável para produções de médias séries, no entanto, com a ajuda dos métodos de programação atualmente existentes e com a redução dos tempos improdutivos (troca de ferramentas e troca da mesa de trabalho), esta solução é, hoje em dia, capaz de concorrer com as máquinas convencionais, relativamente a qualquer quantidade de peças a produzir.

Para se investir nesta tecnologia não devemos fazer uma análise meramente do ponto de vista económico, já que é também necessário ter em consideração os ganhos de produtividade, a qualidade, a redução dos prazos de entrega, a segurança e a flexibilidade acrescida.

2.2.1. CENTRO DE MAQUINAGEM CNC

Um centro de maquinagem, de que é exemplo a máquina apresentada na figura 2.3, é uma máquina-ferramenta baseada numa fresadora, mas que pode apresentar em relação a esta, um conjunto de funções e possibilidades, como por exemplo:

- Troca automática de ferramentas;
- Mesas amovíveis de trabalho;
- Sistema de calibração e deteção automática de quebra da ferramenta;
- Eixos suplementares, rotativos e outros (4º e 5º eixos);
- Blindagens exteriores e transportador de limalha.

Deste modo, podemos caraterizar um Centro de Maquinagem como sendo uma máquina ferramenta na qual é possível realizar a maquinagem completa e automática de uma peça, executar operações de fresar, furar, roscar, mandrilar, trocar automaticamente a ferramenta, fixar a peça em diversas posições e montar e desmontar um trabalho durante a maquinagem de outra peça.

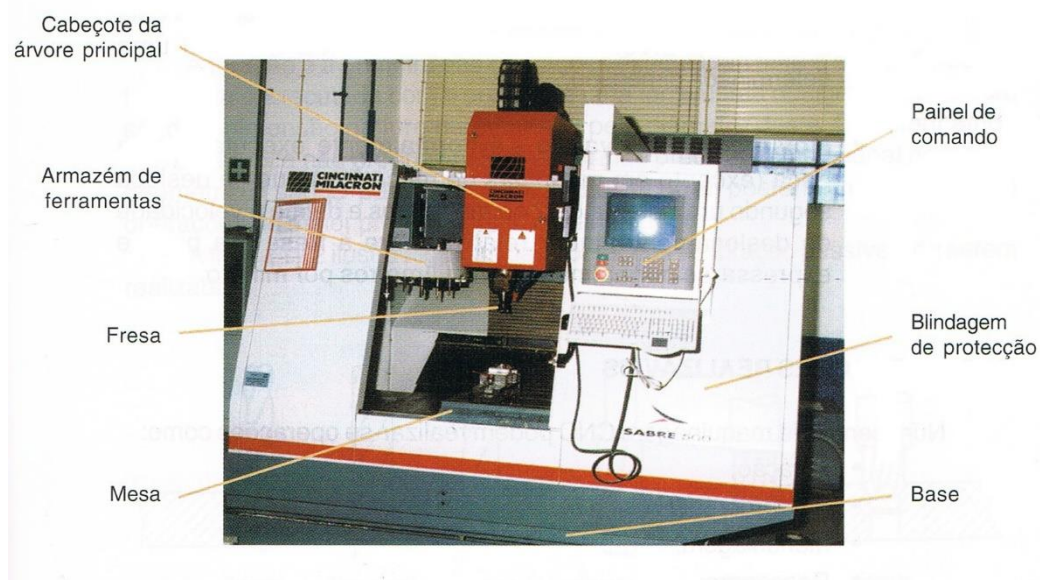


Figura 2.3 – Centro de Maquinagem e sua nomenclatura (Relvas, 2002).

Tal como nas fresadoras, os centros de maquinagem classificam-se conforme o posicionamento da sua árvore principal. Quando esta se encontra na posição vertical designam-se por Centro de Maquinagem vertical, quando se encontra na posição horizontal, por horizontal!

Podem-se ainda distinguir os centros de maquinagem pelo número de eixos segundo os quais se permite a maquinagem de uma peça, que habitualmente são de 3, 4 ou 5 eixos.

Quanto aos movimentos característicos realizados por um centro de maquinagem durante uma operação de fresagem temos:

- Movimento Principal ou de Corte – executado pela fresa que é animada de movimento circular uniforme a uma determinada velocidade de rotação;

- Movimento de Penetração – executado pela fresa que está acoplada à árvore principal e penetra no material uma determinada dimensão;

- Movimento de Avanço – é normalmente executado pela peça (exceto em máquinas de mesa fixa) que se desloca segundo um sistema de 2 ou mais eixos e define a velocidade do deslocamento linear relativo entre a fresa e a peça e expressa-se normalmente em milímetros. O controlador numérico permite o controlo de máquinas e é utilizado principalmente em tornos e centros de maquinagem. Permite o controlo simultâneo de vários eixos, através de uma lista de movimentos escrita num código específico (código G). O "Comando" funciona como um sistema operacional dos computadores desktops, comandando uma máquina CNC, e possibilitando a comunicação com o operador/programador.

Os centros de maquinagem são os mais conhecidos na aplicação CNC, existindo outros equipamentos que também podem ser controlados por um CNC, como máquinas de medir coordenadas, equipamentos para desenho, máquinas para montagem, para corte por laser ou jato de água, para soldadura, etc.

Como podemos constatar na figura 2.3 atrás mencionada, este equipamento deve possuir um dispositivo denominado de armazém de ferramentas, onde as ferramentas ficam armazenadas, prontas a serem utilizadas de um modo rápido.

2.2.2. PAINEL DE CONTROLO DO CENTRO DE MAQUINAGEM

Completo *et al.* (2009) afirma que o teclado alfanumérico do painel de controlo constitui a *interface* que permite as intervenções do operador com a máquina:

- Introdução manual do programa bloco a bloco;
- Introdução automática do programa via RS 232, USB ou outro;
- Introdução das dimensões/corretores de ferramentas na tabela de ferramentas;
- Introdução da localização das “origens peça/origem programa” relativamente à origem máquina na tabela de origens peça;
- Modificação dos corretores de desgaste das ferramentas;

- Realização do diagnóstico de erros do programa peça e sua correção;
- Escolha do modo de funcionamento da máquina – manual, semiautomático (MDI) e automático (RUN);
- Modificação das velocidades de avanço e rotação da árvore através dos potenciômetros do painel.

O operador dispõe de um monitor que permite a visualização:

- Do programa em memória, do bloco corrente, das funções ativas e do estado de variáveis e parâmetros (rotação da árvore e velocidade de avanço);
- Das faltas de sintaxe;
- Das avarias da máquina;
- Das coordenadas do ponto corrente;
- Do erro de seguimento entre a trajetória programada e realizada;
- Dos menus das diferentes tabelas (corretores ferramenta, origens peça);
- Da simulação das trajetórias da ferramenta.

O painel de controlo permite efetuar manualmente os deslocamentos dos eixos da máquina e outras teclas dispõem de funções de comando para definir o modo de trabalho representado por símbolos normalizados. A movimentação manual dos eixos de avanço é bastante utilizada pelo operador durante a fase de preparação e de montagem da máquina que pode ser feita em modo contínuo (*Continuous Jog*), em modo incremental (*Incremental JOG*) ou com auxílio do volante eletrónico (*Handwheel*) para as aproximações mais precisas.

Na figura 2.4 são apresentados 2 exemplos de controladores existentes no mercado. Na figura 2.4 a, um controlador da marca HAAS, e na figura 2.4 b, um controlador da marca Heidenhain, modelo iTNC530.

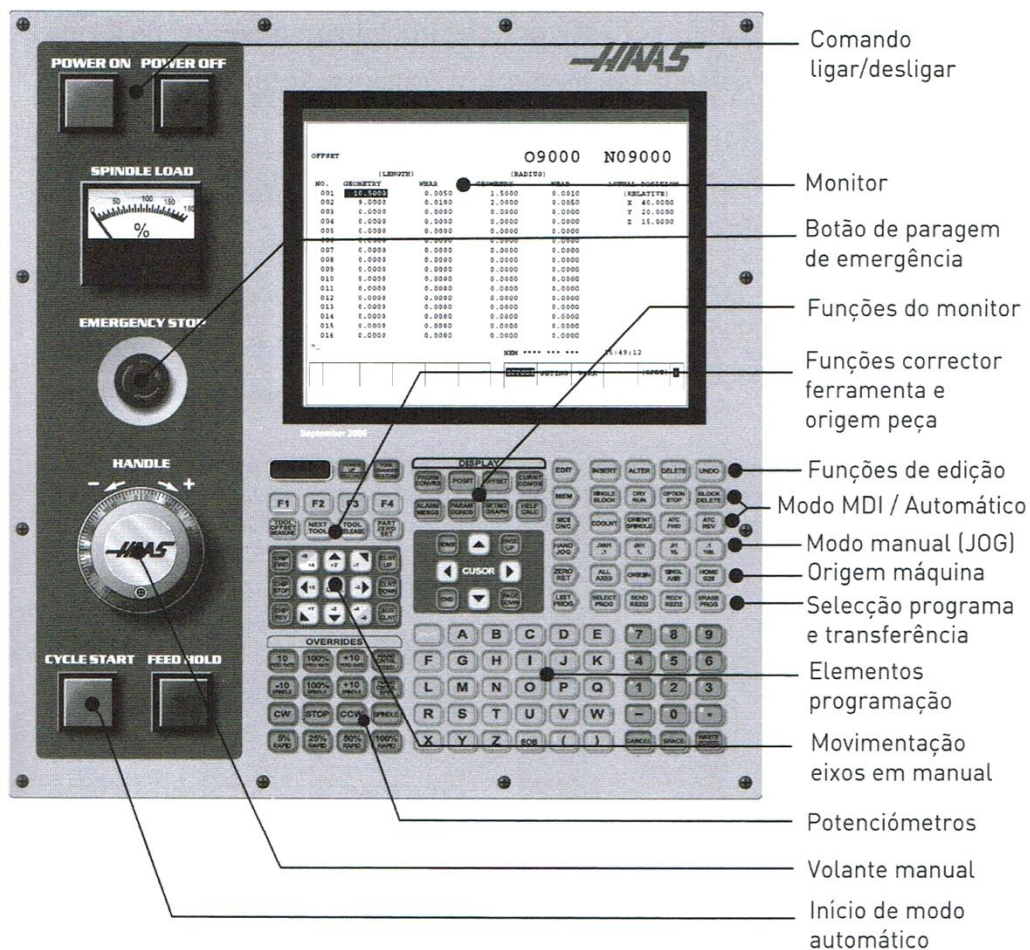


Figura 2.4 a – Painel de Controlo HAAS (Completo *et al.* 2009).



Figura 2.4 b – Painel de Controlo Haindennhain iTNC 530.

2.2.3. GRAUS DE LIBERDADE E SISTEMA DE EIXOS

O número de eixos na fresagem referem-se ao número de graus de liberdade de um centro de maquinagem em posicionar ferramentas de corte, (Cavalheiro, 1998):

2 Eixos: As ferramentas movimentam-se apenas nas direções X e Y, permite apenas aplicações planares;

2 ½ Eixos: Acrescenta-se a maquinagem no eixo Z, o qual pode ser posicionado, mas não pode ser usado em movimentos simultâneos com os eixos X e Y, é utilizado para posicionar a ferramenta em níveis de profundidade de corte. É possível utilizar a maquinagem 2 ½ eixos para fabricar peças tridimensionais;

3 Eixos: Movimenta os eixos X, Y e Z simultaneamente durante a maquinagem, permite a interpolação linear utilizando os três eixos simultaneamente, mas as interpolações circulares podem ser realizadas apenas em duas dimensões;

4 Eixos: Adiciona-se às características de maquinagem tridimensional e acrescenta-se respetivamente, um ou dois eixos de rotação controláveis, permite o posicionamento da ferramenta através da rotação da mesa da máquina em torno de um eixo perpendicular à mesa;

4 Eixos simultâneos: Como descrito acima, mas com o quarto eixo utilizado também para movimentos de corte, simultaneamente 3 eixos cartesianos;

5 Eixos: Segundo Souza *et al.* (2009), na maquinagem com cinco eixos, além dos 3 eixos cartesianos são atribuídas possíveis rotações sob os eixos cartesianos. Os eixos adicionais estão associados a movimentos rotativos que podem ocorrer na mesa da máquina e/ou no eixo árvore, dependendo do projeto utilizado pelo fabricante.

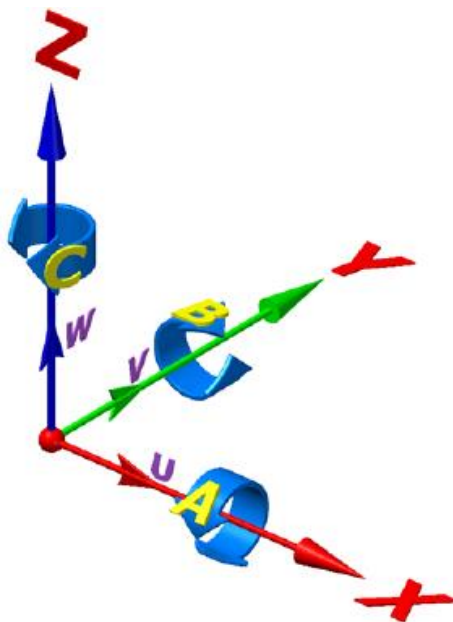


Figura 2.5 – Representação da nomenclatura utilizada em sistema de coordenadas (MASTERCAM®, 2011).

Souza *et al.* (2009), divide a fresagem por 5 eixos em 3+2 eixos e em cinco eixos simultâneos. Quando nos referimos a 3+2 eixos significa que a remoção de material é realizada em movimentações de 3 eixos e a máquina pode posicionar-se em outras duas direções. No caso de cinco eixos simultâneos a remoção de material pode ser realizada em movimentações da ferramenta em cinco eixos simultaneamente.

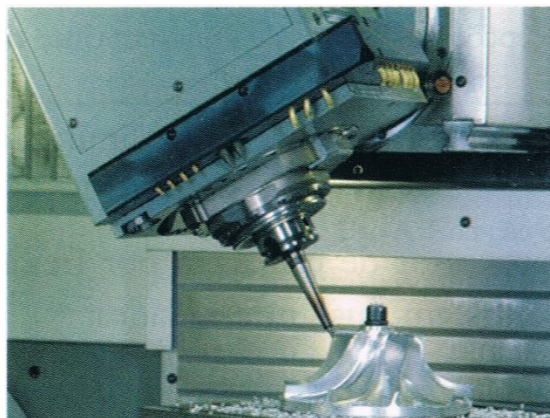


Figura 2.6 – Peça maquinada por fresagem simultânea de 5 eixos (Souza *et al*, 2009).

Atualmente a aplicação mais comum para centros de maquinagem CNC envolve a utilização de três eixos coordenados para movimentação linear da máquina. Contudo, centros contendo quatro e cinco eixos de movimento são encontrados em empresas, centros de formação e universidades e possuem um futuro promissor.

2.2.4. CENTROS DE MAQUINAGEM MULTIEIXOS

Os movimentos adicionais de um centro de maquinagem multieixos, aumentam consideravelmente as capacidades de expandir a variedade das peças que podem ser maquinadas. As máquinas de multieixos podem ser do tipo Mesa/Mesa, Árvore/Mesa e Árvore/Árvore.

Uma máquina do tipo Mesa/Mesa, possui ambos os eixos rotativos na mesa, como se ilustra na figura seguinte, 3 eixos de translação X, Y e Z e 2 eixos de rotação, A e C.

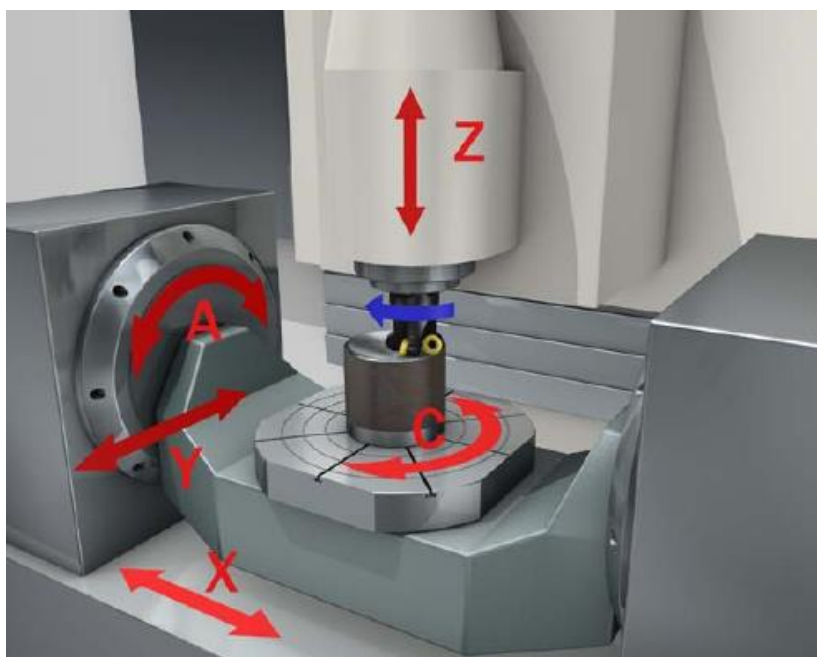


Figura 2.7 – Centro de Maquinagem do tipo Mesa/Mesa (MASTERCAM®, 2011).

No caso de um centro de maquinagem do tipo Árvore/Mesa, existe um eixo rotativo na mesa e outro na árvore, trabalhando estes independentemente um do outro. Como se pode visualizar na figura 2.8, existem 3 eixos de translação X, Y e Z e 2 eixos de rotação, neste caso os eixos B e C.

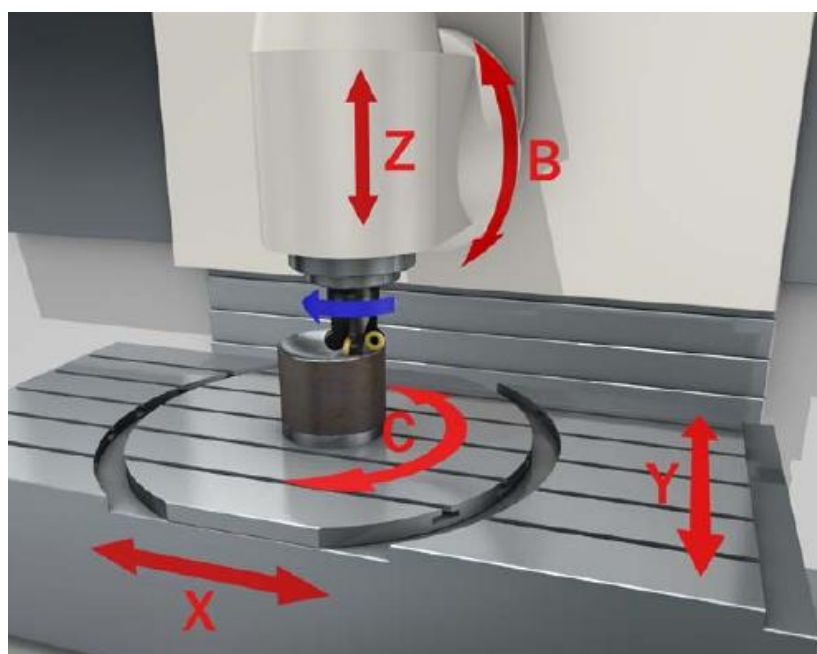


Figura 2.8 – Centro de Maquinagem do tipo Árvore/Mesa (MASTERCAM®, 2011).

No caso das máquinas do tipo Árvore/Árvore ambos os eixos de rotação se encontram na árvore. Tal como nos casos anteriores existem 3 eixos de translação e 2 eixos de rotação.

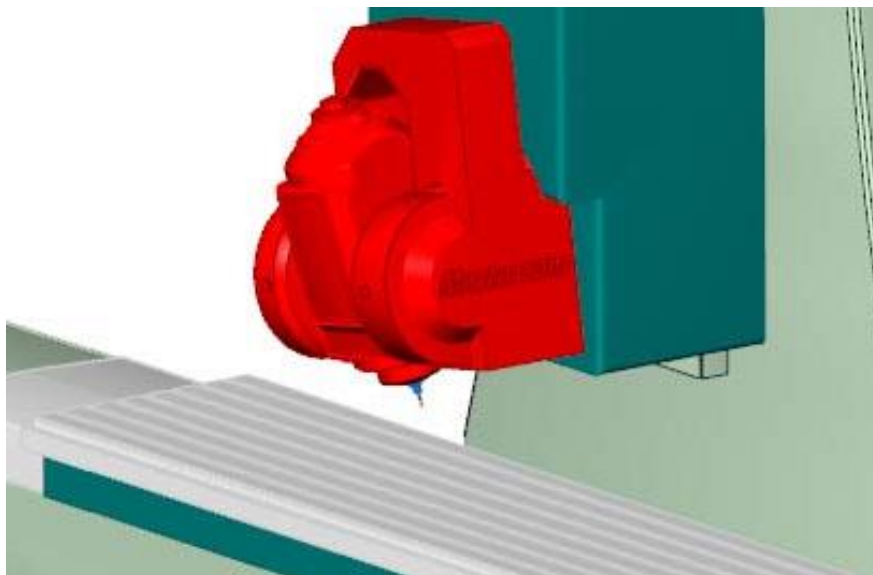


Figura 2.9 – Centro de Maquinagem do tipo Árvore/Árvore (MASTERCAM®, 2011).

2.3. PROGRAMAÇÃO CNC

2.3.1. APARECIMENTO E DESENVOLVIMENTO DO CNC

O Comando Numérico Computorizado foi desenvolvido nos Estados Unidos da América em 1942, para satisfazer as necessidades da indústria aeronáutica. De início, estes equipamentos dispunham de leitores de fita perfurada para introdução dos códigos do programa na memória do controlador. Com o surgimento dos microprocessadores e com o progresso da eletrónica, o custo destes equipamentos foi decrescendo desde 1970, sendo no entanto, numa fase inicial, bastante semelhantes às máquinas-ferramenta convencionais, com a incorporação de controlador para acionar e controlar os movimentos dos eixos de maquinagem (figura 2.10).

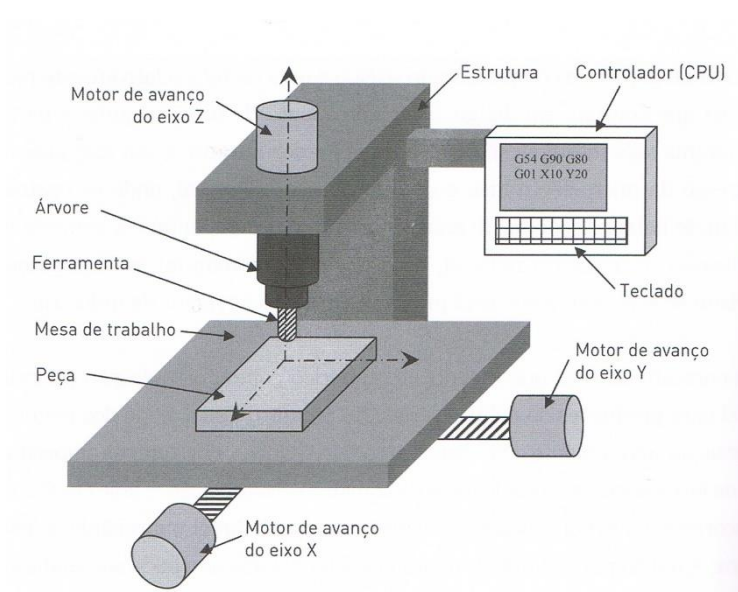


Figura 2.10 – Representação esquemática de uma máquina ferramenta de comando numérico computadorizado (Completo *et al*, 2009).

Através dos meios colocados à disposição inicia-se a realização do programa peça:

- Seja em Programação manual por análise e cálculo das trajetórias das ferramentas, redação do programa CNC em papel ou formato texto eletrónico (txt). O programa em causa pode ser introduzido na máquina via teclado ou via suporte externo da máquina (RS232, USB, CD), são habitualmente realizadas desta forma peças de geometria simples.

- Seja através de CAD/CAM utilizando a geometria da peça e pós processadores (programa de conversão de sintaxe), sendo este introduzido na máquina via suporte externo (RS232, USB, CD). Normalmente são realizadas neste modo peças de geometrias evolutivas com superfícies complexas tais como os moldes, ferramentas para estampagem de chapa, etc.

Ir-se-á agora abordar a forma como é realizada a Programação manual, até porque esta é importante para se realizar a interpretação dos programas gerados através dos *softwares* CAD/CAM e Pós-Processadores.

O programa CNC é redigido em relação a um triedro de referência escolhido pelo programador, denominado por “zero peça”, que é muitas vezes posicionado num ponto singular da peça acabada, a partir do qual se determinam as cotas dos pontos de posicionamento e pontos característicos das trajetórias das ferramentas.

O programa descreve o tipo de operação a realizar, as trajetórias a assegurar ou a localização da operação de maquinagem, o número da ferramenta a utilizar e as condições operatórias (velocidade de rotação da árvore, avanço, etc), acaba por ser uma sucessão de instruções totalmente definidas onde nada é deixado ao acaso.

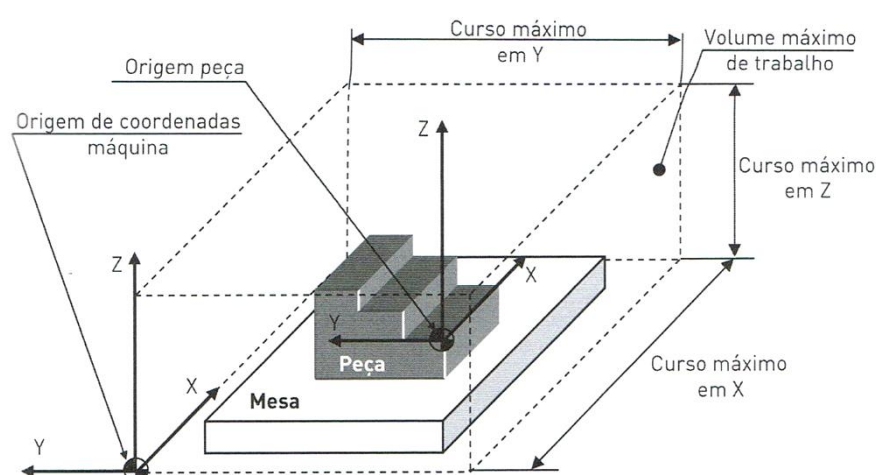


Figura 2.11 – Sistema de coordenadas da máquina e da peça a maquinar.

O operador que trabalha diretamente com a máquina CNC deve:

- Posicionar corretamente a peça inicial no referencial da máquina, respeitando a orientação dos eixos de acordo com o escolhido pelo programador e verificando que as trajetórias programadas não saem dos limites dos cursos (X, Y e Z) da máquina.

- Informar o controlador da posição de “origem da peça” relativamente à origem do referencial da máquina, que é a origem do sistema de medida.

2.3.2. OS PASSOS DA OPERAÇÃO E TERMOS DA PROGRAMAÇÃO CN

A maquinagem de uma peça numa máquina CNC pode ter várias operações, como o facejamento, a furação, a mandrilagem, entre outras, o programa peça pode ser entendido como um texto onde estão contidas todas as instruções capazes de controlar sequencialmente a execução de cada uma das operações.

A sequência dos passos da operação pode ser descrita através de um texto. Este texto contém as informações tecnológicas e geométricas, a cada uma das operações designa-se por programação verbal.

Um programa CN é um texto de instruções que é constituído por linhas ou blocos de programação, em que cada bloco contém habitualmente uma ou várias instruções conforme a capacidade do controlador, e cada instrução pode ser composta por um ou mais termos.

A linguagem de programação de um controlo estabelece como são formados os blocos e quais as regras de programação. Os blocos são constituídos por termos, que por sua vez são constituídos por uma letra de endereço (componente alfabética) e uma sequência de algarismos (componente numérica).

Mencionam-se em seguida o significado de cada uma das letras de endereço mais usadas, assim como a respetiva componente numérica de cada termo:

a) N – N° da sequência – Este termo corresponde ao número da sequência do bloco de programação e é inscrito por uma sequência de números inteiros que normalmente varia entre 2 e 4 algarismos com incrementos de 10 em 10 (como por exemplo: N10, N20, ..., N1000, N1010,...);

b) X, Y, Z – Comando dos Eixos de Movimento – Estes termos indicam as coordenadas dos pontos de chegada do deslocamento segundo os valores atribuídos respetivamente para cada um dos eixos X, Y, ou Z. A sua sequência algébrica é normalmente expressa por 4 algarismos inteiros e 3 decimais para unidades métricas.

c) G – Função Preparatória – Estas funções representam o principal conteúdo de um programa CNC e são iniciados pela letra G seguidas de um número entre 0 e 99. Representam a chamada ao controlador para realização de uma tarefa bem definida.

É possível programar instruções diferentes tais como:

- Unidades do sistema;
- Tipo de trajetória;
- Correções da ferramenta;
- Ciclos automáticos;
- Etc.

No âmbito do presente trabalho considerou-se pertinente explicar a utilidade de algumas das principais funções preparatórias da programação CNC:

G01 – Interpolação Linear – Deslocamento em trabalho entre dois pontos e segundo uma linha reta.

Os eixos movimentam-se para a posição final em linha reta com a velocidade de avanço programada.

Exemplo: G01 X300 Y200 Z50 F100 [movimento linear para a posição X300, Y200, Z50 com um avanço de trabalho de 100 mm/min].

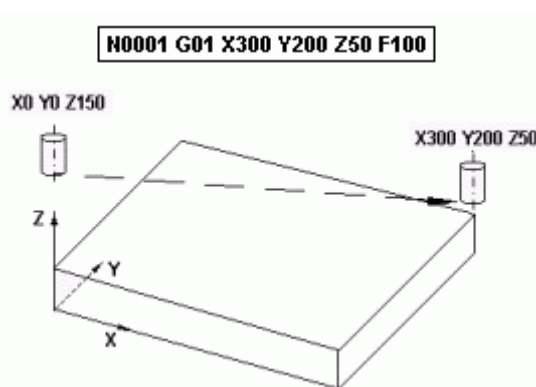


Figura 2.12 – Trajetória da ferramenta entre a posição inicial (0, 0,150) e final (300, 200,50) em movimento de trabalho G01.

G02/G03 – Interpolação Circular – Permite programar o deslocamento da ferramenta ao longo de um arco de circunferência gerado pelo sistema de controlo:

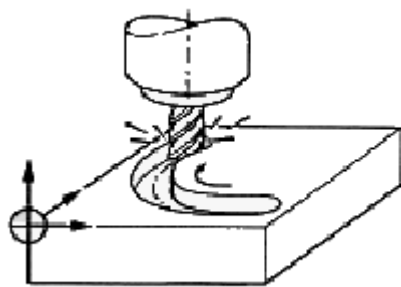


Figura 2.13 - G02 - interpolação circular no sentido inverso (Sentido dos ponteiros do relógio - C.W).

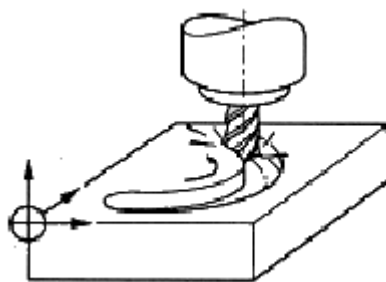


Figura 2.14 - G03 - interpolação circular no sentido direto (Sentido contrário ao dos ponteiros do relógio - C.C.W).

Para a interpolação circular existem dois métodos de programação, poderá ser pelas coordenadas do centro do arco ou pelo raio:

Programação das coordenadas através do centro do arco:

Souza *et al.* (2009) afirma que para se construir um círculo, matematicamente são necessários 3 pontos e desta forma, o programa de CNC deve conter a informação dos pontos de início, fim e centro do círculo.

A interpolação circular permite programar o deslocamento da ferramenta ao longo de um arco de circunferência, este comando fica definido através do posicionamento da ferramenta no ponto inicial do arco introduzindo as coordenadas finais do arco (P2) e as do centro do arco (I, J, K) ou o seu raio (R). As coordenadas do centro do arco são sempre dadas relativamente à sua posição inicial e pode variar de acordo com o tipo de controlo utilizado na máquina, sendo o mais vulgar o da indicação das coordenadas relativas que definem o vetor da distância entre o ponto de início e o ponto de centro do arco programado.

A interpolação circular é possível ser realizada num dos planos de trabalho, como podemos observar na figura seguinte:

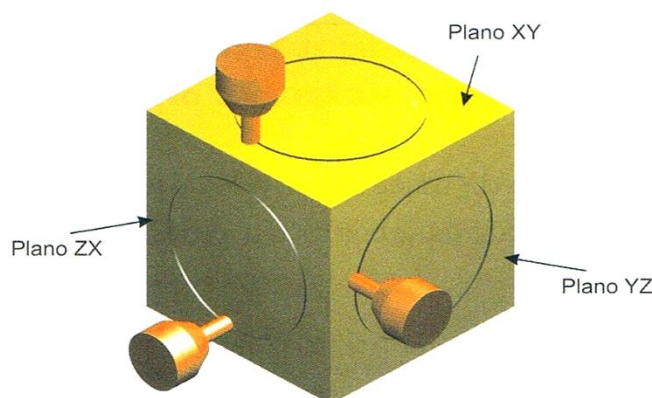


Figura 2.15 – Planos de trabalho para interpolação circular de trajetórias de ferramenta (Souza *et al.* 2009).

Exemplo de interpolação circular no sentido inverso em coordenadas relativas (G91):

G02 X40 Y30 I25 J20 F300 [Movimento circular em avanço de trabalho de 300 mm no sentido dos ponteiros do relógio para a posição final X40, Y30, com centro a uma distância de 25 mm segundo X (I) e 20 mm segundo Y (J)].

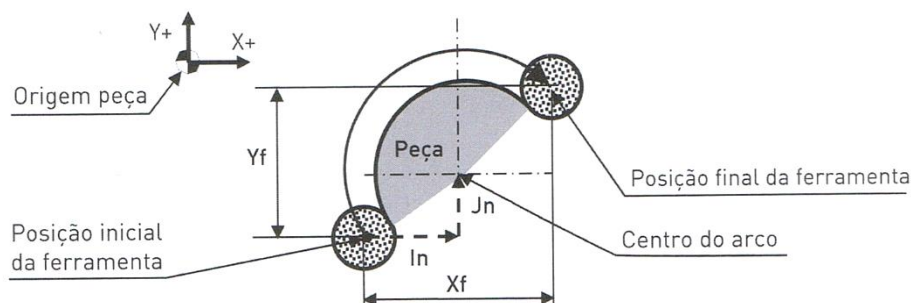


Figura 2.16 – Planos Exemplo de interpolação circular no sentido inverso em coordenadas relativas, (Completo *et al.*, 2009).

Programação das coordenadas através do raio:

O raio é a distância do ponto do centro a qualquer ponto do arco, e pode ser usado na programação definindo-se o raio do arco em vez dos termos I, J, K. Estas funções podem ser programadas em modo absoluto (G90) ou incremental (G91).

Exemplo: G90 G03 X100 Y30 R20 F300 [Programação em modo absoluto do movimento circular em avanço de trabalho de 300 mm/min no sentido contrário aos ponteiros do relógio para a posição final X100, Y30 com o raio de 20 mm].

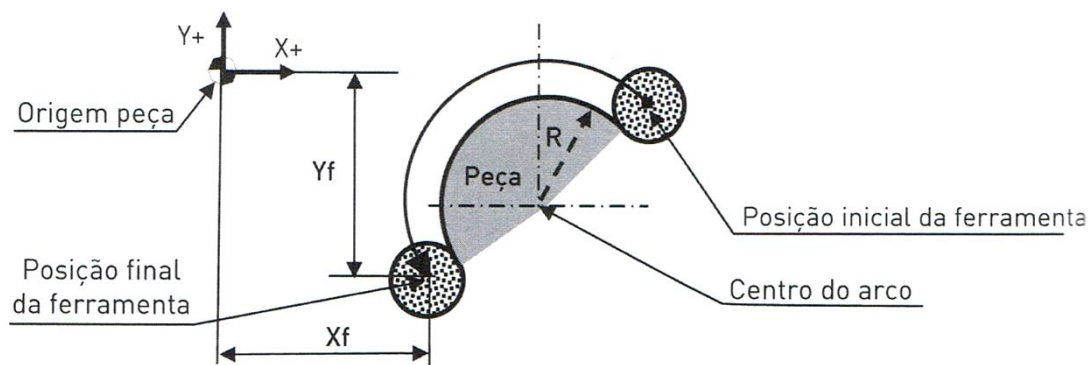


Figura 2.17 – Interpolação circular no sentido direto (G03) em coordenadas absolutas (G90) (Completo *et al*, 2009)

G17/G18/G19 – Planos de Trabalho – Estas funções seleccionam o plano de trabalho segundo o qual são executados os movimentos da ferramenta:

- G17 – Selecciona o plano de trabalho XY;
- G18 – Selecciona o plano de trabalho ZX;
- G19 – Selecciona o plano de trabalho YZ.

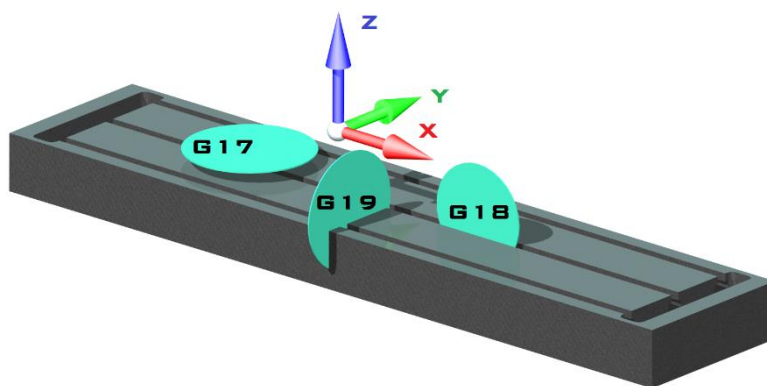


Figura 2.18 – Representação esquemática dos 3 planos de trabalho.

G40/G41/G42 – Compensação automática do raio da ferramenta – Esta função permite ao CNC ter em consideração o centro da ferramenta e o contorno da peça a maquinar, mesmo usando ferramentas de raios diferentes, bastando para o efeito assinalar no controlador o raio da ferramenta utilizada.

- G40 – Cancela a compensação automática do raio da ferramenta;
- G41 – Compensação à esquerda do ponto de centro da ferramenta;
- G42 – Compensação à direita do ponto de centro da ferramenta.

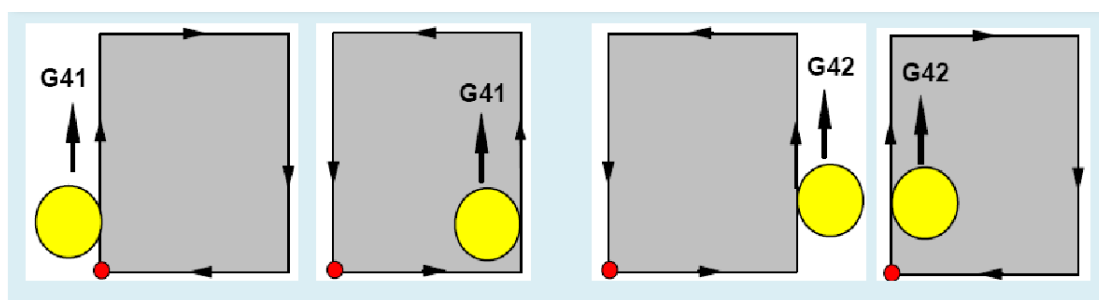


Figura 2.19 – Representação esquemática da compensação do raio da ferramenta.

Exemplo: G41 G01 X100 Y20 D01 F250 [Movimento linear em avanço de trabalho da rampa de compensação à esquerda para a posição X100, Y20 com o corretor ao diâmetro D01, com um avanço de trabalho de 250 mm/min].

G43/G44/G49 – Compensação automática do raio da ferramenta – Estas funções permitem fazer a compensação do comprimento da ferramenta em função dos diferentes comprimentos de cada uma das ferramentas utilizadas.

- G43 – Compensação da ferramenta no sentido positivo;
- G44 – Compensação do comprimento no sentido negativo;
- G49 – Cancelamento da compensação do comprimento da ferramenta.

Exemplo: G01 G43 H01 Z20 [Movimento linear de trabalho para a posição Z20, tendo em conta o comprimento da ferramenta].

A tabela 2.1 apresenta a lista de funções preparatórias (códigos G) que podem ser utilizadas na programação.

Tabela 2.1 – Principais funções preparatórias.

Código	Função
G00	Deslocamento rápido entre dois pontos indicados em coordenadas absolutas ou incrementais
G01	Deslocamento em trabalho entre dois pontos e segundo uma linha reta - Interpolação Linear
G02	Deslocamento em trabalho entre dois pontos e segundo um arco de circunferência percorrido em sentido horário- Interpolação Circular
G03	Deslocamento em trabalho entre dois pontos e segundo um arco de circunferência percorrido em sentido anti-horário – Interpolação Circular
G04	Paragem temporizada
G15	Cancela o sistema de coordenadas polares
G16	Ativa o sistema de coordenadas polares
G17	Seleção do Plano XY
G18	Seleção do Plano ZX
G19	Seleção do plano YZ
G20	Entrada de dados em polegadas
G21	Entrada de dados em milímetros
G27	Cancela o retorno ao ponto de referência da máquina
G28	Retorno ao ponto de referência da máquina passando por um ponto intermédio dado
G40	Anulação da correção do raio da ferramenta tanto à direita como à esquerda
G41	Correção à esquerda do raio da ferramenta
G42	Correção à direita do raio da ferramenta
G43	Correção do comprimento da ferramenta no sentido positivo
G44	Correção do comprimento no sentido negativo
G49	Cancela a correção do comprimento da ferramenta
G50	Anulação do fator de escala
G51	Fator de escala
G54 a G59	Ativação da origem de programação peça
G68	Rotação do sistema de coordenadas
G69	Cancela rotação do sistema de coordenadas
G70	Ciclo de furação segundo círculo
G71	Ciclo de furação segundo arco
G72	Ciclo de furação segundo um ângulo
G73	Ciclo de furação rápida
G74	Ciclo de roscagem em sentido anti-horário
G80	Cancela ciclo de furação.
G81	Ciclo de furação simples
G83	Ciclo de furação profunda.
G84	Ciclo de roscagem em sentido horário.
G90	Programação por coordenadas absolutas
G91	Programação por coordenadas incrementais

d) M – Função auxiliar – Utilizam-se para indicar à máquina outras funções complementares tais como:

- Ligar ou desligar determinadas funções ou acessórios;
- Paragens do programa;
- Sentido de rotação da árvore principal;
- Mudança de ferramenta.

A tabela 2.2 apresenta a lista de funções auxiliares (códigos M) que podem ser utilizadas na programação.

Tabela 2.2 – Principais funções auxiliares.

Código	Função
M00	Paragem de programa.
M02	Fim de programa (e do trabalho) M02 reinicializa o sistema e apaga todos os registos, deixando o apontador no último bloco.
M03	Rotação do eixo-árvore no sentido horário. A velocidade de rotação é programada pela letra S (<i>spindle</i>) [rpm]
M04	Rotação do eixo-árvore no sentido anti- horário. A velocidade de rotação é programada pela letra S (<i>spindle</i>) [rpm]
M05	Paragem da árvore.
M06	Troca automática de ferramenta. Neste caso, deve-se informar o número da ferramenta, posicionada no armazém de ferramentas, posteriormente à letra T (<i>tool</i>).
M08	Ligar líquido de refrigeração.
M09	Desliga líquido de refrigeração.
M13	Colocação da árvore em rotação no sentido horário e ligação do líquido de refrigeração.
M14	Colocação da árvore em rotação no sentido anti - horário e ligação do líquido de refrigeração.
M30	Fim do programa.

e) F – Velocidade de avanço – Este termo é utilizado para quantificar o valor da velocidade de avanço da ferramenta durante a maquinagem. A sua sequência algébrica pode variar conforme o avanço é expresso em mm/min ou em mm/rot.

f) S – Velocidade de Rotação – Determina a velocidade de rotação da árvore principal, podendo também indicar a velocidade de corte. É obrigatoriamente expresso em partes inteiras, estando obviamente limitado pelas próprias características da máquina (velocidade de rotação máxima).

g) I, J, K – Vetores de posição do Centro para a Interpolação Circular – Estes termos indicam as coordenadas do centro da interpolação circular, sendo:

I – O vetor de posição do centro do arco medido sobre o eixo X;

J – O vetor de posição do centro do arco medido sobre o eixo Y;

K – O vetor de posição do centro do arco medido sobre o eixo Z.

h) T – Número da ferramenta – Este termo indica o número da ferramenta selecionada para executar a operação.

i) H ou D - Corretor da ferramenta (Offset) – Utiliza-se normalmente para designar o número do corretor da ferramenta que se está a usar. A designação de corretor é vulgarmente substituída pela palavra “Offset” permitindo, por exemplo, fixar o valor da compensação automática do raio.

2.4. SISTEMAS CAM

2.4.1. INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS CAM

A palavra CAM deriva do Inglês *Computer Aided Manufacturing* que significa em Português Fabrico Assistido por Computador, remontando a origem deste ao desenvolvimento das máquinas controladas numericamente (C.N.) no final dos anos 40 e início dos 50. Quando estas máquinas começaram a ser controladas por computador, no fim dos anos 50, início dos anos 60, surgiu o termo C.N.C (Controlo Numérico Computorizado). Atualmente o termo CNC engloba diversos processos automáticos de fabricação, tais como; fresagem, torneamento, oxicorte, corte a Laser, entre outros.

Um sistema CAM pode ser utilizado na criação de programas CNC para maquinagem por fresagem, torneamento, furação, eletroerosão a fio, retificação, etc (Souza *et al*, 2009).

O CAM facilita a criação de componentes com geometrias complexas que programando através de CNC seria muitas vezes de extrema complexidade. A figura 2.20 ilustra a simulação da trajetória da ferramenta calculada num sistema CAM e a figura 2.21 mostra o processo produtivo, neste caso relativo à maquinagem de parte de um molde.

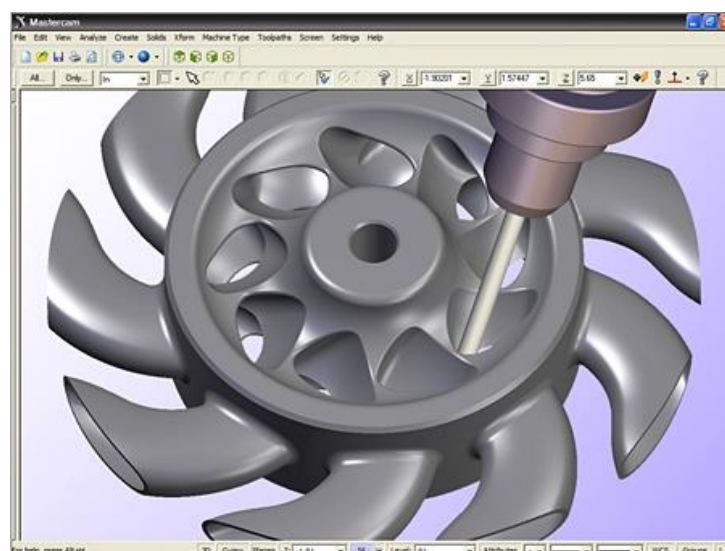


Figura 2.20 – Simulação de Maquinagem através de um *software* CAM (MASTERCAM®).



Figura 2.21 – Fabrico de Moldes num Centro de Maquinagem.

O CAM é neste momento um sistema usado em escolas, centros de formação profissional e universidades, estando-se neste momento a realizar diversos mestrados, doutoramentos e obviamente projetos de investigação nesta área. Também a indústria a nível mundial utiliza intensamente o CAM para fabrico de componentes, nomeadamente aeronáutica, automobilística e moldes. Um grande número de sistemas CAM encontram-se disponíveis no mercado, alguns trabalham integrados em pacotes CAD/CAM e muitas das vezes são sistemas de grande porte (Souza *et al*, 2009).

Tem sido na maquinagem por fresagem que o CAM se tem destacado, pois, neste processo, as movimentações da ferramenta de corte são, por demasiadas vezes muito complexas, exigindo recursos computacionais para calculá-las.

Na realização deste trabalho chegou-se à conclusão que seria pertinente realizar uma pesquisa sobre os *softwares* CAM mais utilizados:

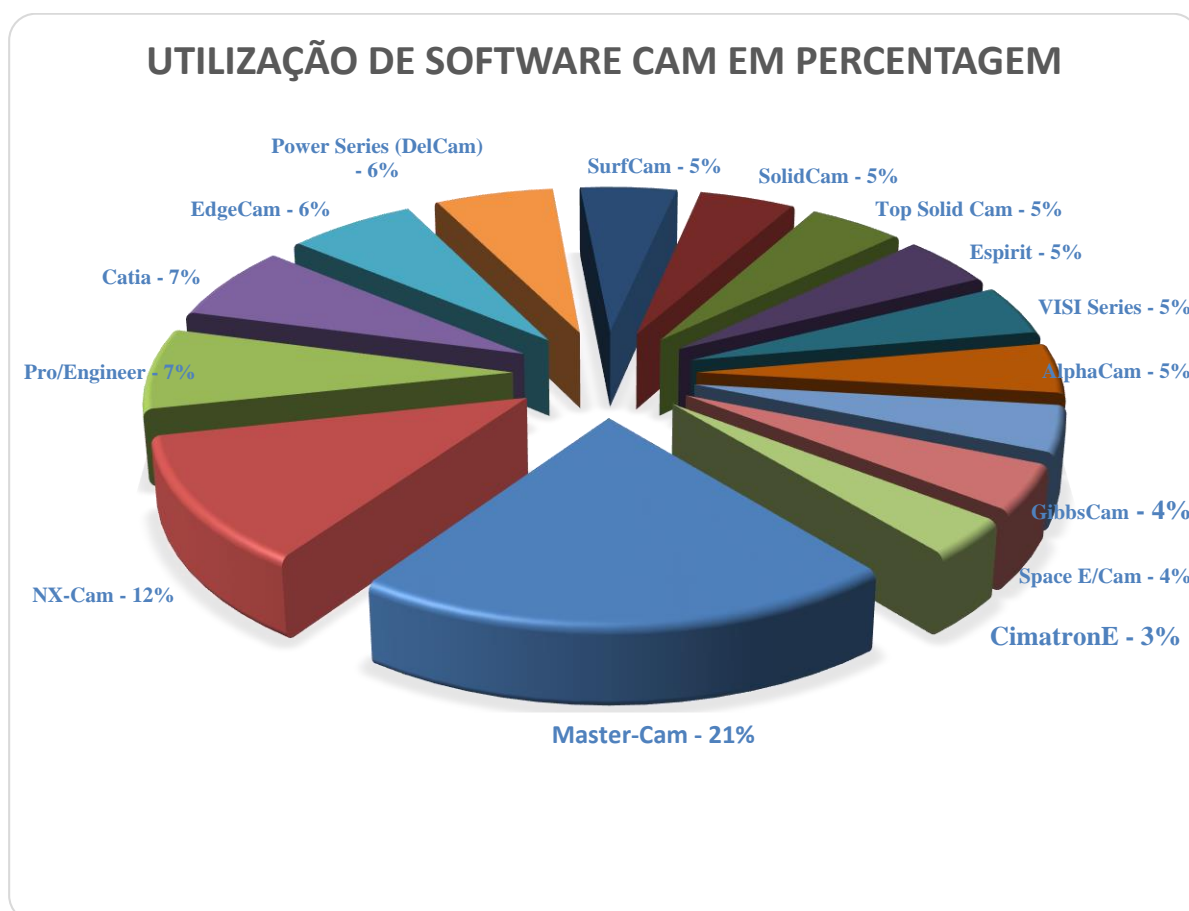


Figura 2.22 – Utilização no Mundo de *software* CAM em percentagem (Adaptado de MASTERCAM®, 2012)

2.4.2. EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS CAM

De acordo com Voisinnet (1988), o Fabrico Assistido por Computador (CAM) utiliza-se do resultado do Desenho Assistido por Computador (CAD). A combinação de CAD e CAM potenciam a produtividade e a precisão.

No início da década de 1990, o desenvolvimento de *hardware* e *software* permitiu que os sistemas CAM pudessem ser executados em computadores pessoais, tornando-se mais acessíveis à indústria. Ainda nessa época, existiam algumas limitações na programação CNC por sistemas CAM. Erros nas trajetórias calculadas eram comuns e quando não detetados podiam danificar o trabalho, danificar a ferramenta ou até mesmo a máquina, as trajetórias calculadas nos correntes dias são muito mais seguras.

Até ao final da década de 1990 os cálculos das trajetórias eram extremamente lentos, mesmo utilizando computadores sofisticados para a época, a etapa da simulação da maquinagem era bastante limitada já que a simulação não detetava colisões. Hoje, as simulações além de mais precisas, são mais rápidas. A variedade de trajetórias de ferramenta eram extremamente limitadas e existiam poucas opções para desbaste e acabamento.

Mesmo com todas estas dificuldades, a utilização de sistemas CAM propiciou uma significativa evolução no processo de programação CNC para o fabrico de moldes, matrizes e peças contendo formas geométricas complexas.

Souza *et al.* (2009) afirmam que, atualmente os sistemas CAM, para fresamento de três eixos estão num patamar evolutivo, atingindo o seu pico quanto aos cálculos de trajetórias e simulação, e atualmente os sistemas CAM para maquinagem a 5 eixos simultâneos, encontram-se no mesmo patamar que os sistemas CAM para maquinagem de 3 eixos se encontravam na década de 90.

2.4.3. OPERAÇÕES DE FRESAGEM CNC PROGRAMADAS POR SISTEMAS CAM

Atualmente, com o desenvolvimento dos *softwares* CAM, diferentes possibilidades de trajetórias de ferramenta têm vindo a ser implementadas. Isto permite uma certa flexibilidade ao programador para definir a estratégia de corte mais adequada para determinada aplicação.

Existem diversos comandos que podemos aplicar no *software* MASTERCAM® para realizar as diferentes trajetórias. Para trajetórias a 2 eixos ou 2 ½ eixos utilizamos os comandos *Contour*, *Drill*, *Pocket*, *Face*, etc.

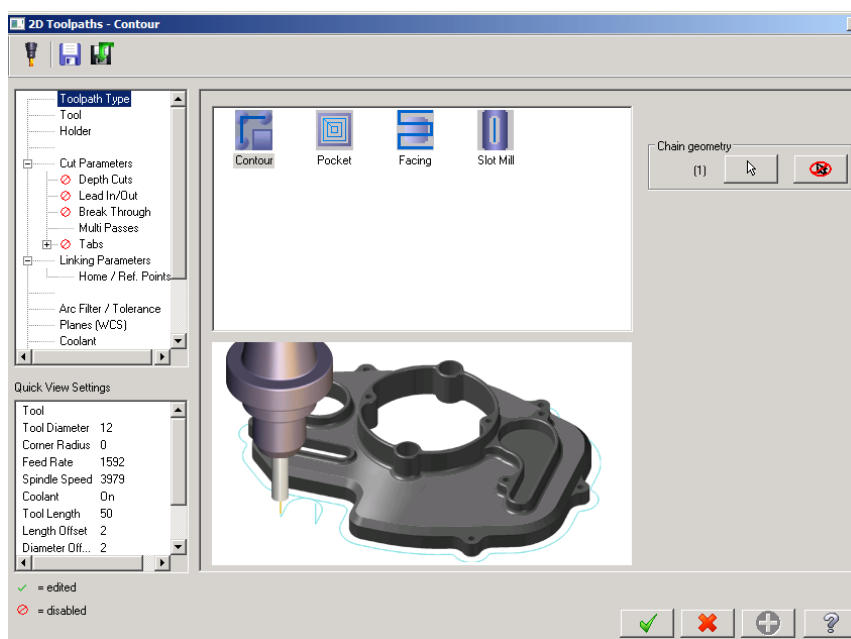


Figura 2.23 – Exemplo de programação de uma operação *Contour* no *software* MASTERCAM®.

Para 3 eixos são válidas todas as operações referidas anteriormente, mas existem outras, para desbaste: *Core Roughing*, *Area Clearance*, *Rest-Roughing*, *Opticore*, *Optiarea*, etc. Em relação às operações de acabamento temos operações como *Horizontal Área*, *Pencil*, *Raster*, *Scallop*, *Waterline*, *Hybrid*, etc.

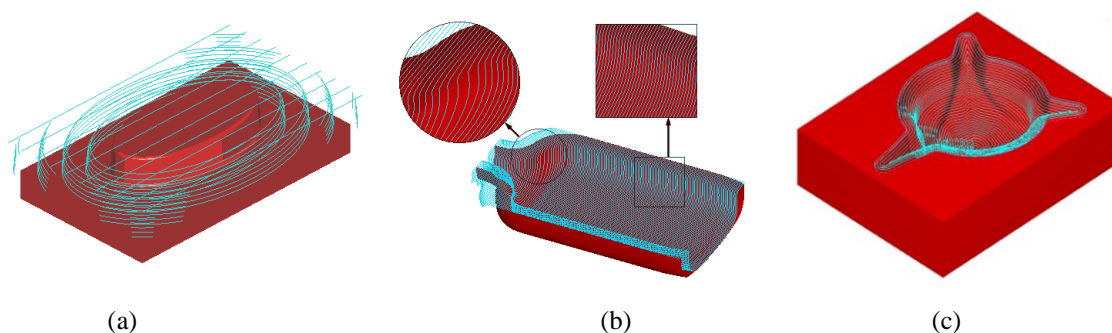


Figura 2.24 – Diferentes trajetórias de ferramenta para 3 eixos no MASTERCAM®: a) *Core Roughing*, b) Raster e c) Scallop.

Nos dias correntes são ainda necessários programadores com bons conhecimentos e alguma experiência para realizar um processo eficiente. Cada estratégia de maquinagem pode ser mais adequada para uma geometria específica (como áreas planas, inclinadas, côncavas e convexas). A escolha de entre as diferentes trajetórias de ferramenta pode representar uma grande influência sobre o tempo necessário para a maquinagem, desgaste de ferramentas de corte e qualidade superficial (Weinert e Guntermann, 2000).

Com a utilização de sistemas CAM, é possível gerar trajetórias de ferramenta sobre geometrias bastantes complexas. Manualmente, esta programação é completamente inviável, devido à dificuldade de se representar uma trajetória complexa.

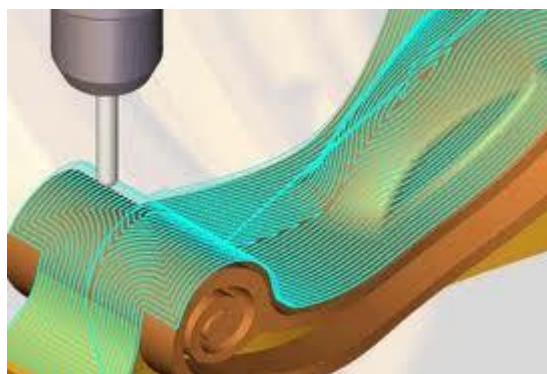


Figura 2.25 – Trajetórias de ferramenta sobre geometrias complexas.

2.4.4. TOLERÂNCIA E CÁLCULO DAS TRAJETÓRIAS DE FERRAMENTA

Para o cálculo dos programas NC num *software* CAM, inicialmente é necessário um modelo CAD. Para esta transferência de dados geométricos de CAD para o CAM a maioria dos sistemas utiliza uma malha de triângulos gerada sobre a geometria original gerada no CAD e é esta malha que será utilizada como modelo geométrico para a geração de programas NC (Schutzer e Souza, 2000). Esta malha de triângulos aproxima-se da representação geométrica desenhada no CAD através de um valor de tolerância definido pelo utilizador, como se apresenta na figura seguinte:

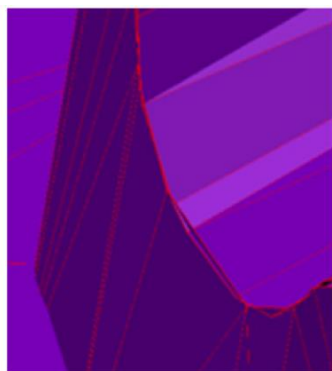


Fig. a – Tol. 1 mm

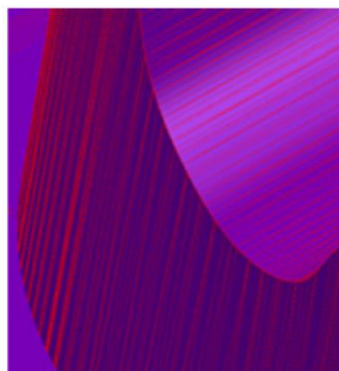


Fig. b – Tol. 0,01 mm

Figura 2.26 – Malha gerada com diferentes tolerâncias.

Esta metodologia tem por objetivo facilitar a transferência de dados geométricos entre os sistemas CAD e CAM. O inconveniente deste processo está na conversão para segmentos de retas (triângulos), de uma geometria gerada por um modelo matemático complexo, capaz de representar precisamente qualquer forma geométrica. Quanto menor a tolerância para triangularização, melhor descrita será a geometria, mas proporcionalmente aumenta-se o tamanho dos arquivos de transferência (Souza *et al*, 2009).

Segundo Souza *et al*, (2009), o CAM ajusta a trajetória da ferramenta dentro de uma banda de tolerância definida pelo programador, conhecida como *chord error*. Quanto menor o *chord error*, mais próxima a trajetória da ferramenta estará da geometria CAD.

Souza (2001), afirma que, na interpolação linear, o sistema CAM determina a trajetória da ferramenta através de segmentos de reta que melhor se adaptam ao *chord error* do sistema CAM.

A figura seguinte apresenta um exemplo da geração de segmentos de reta ao longo de uma geometria, respeitando a banda de tolerância utilizada pelo programador do sistema CAM. Nota-se que a geometria da peça tem significativa influência no tamanho do segmento de reta gerado.

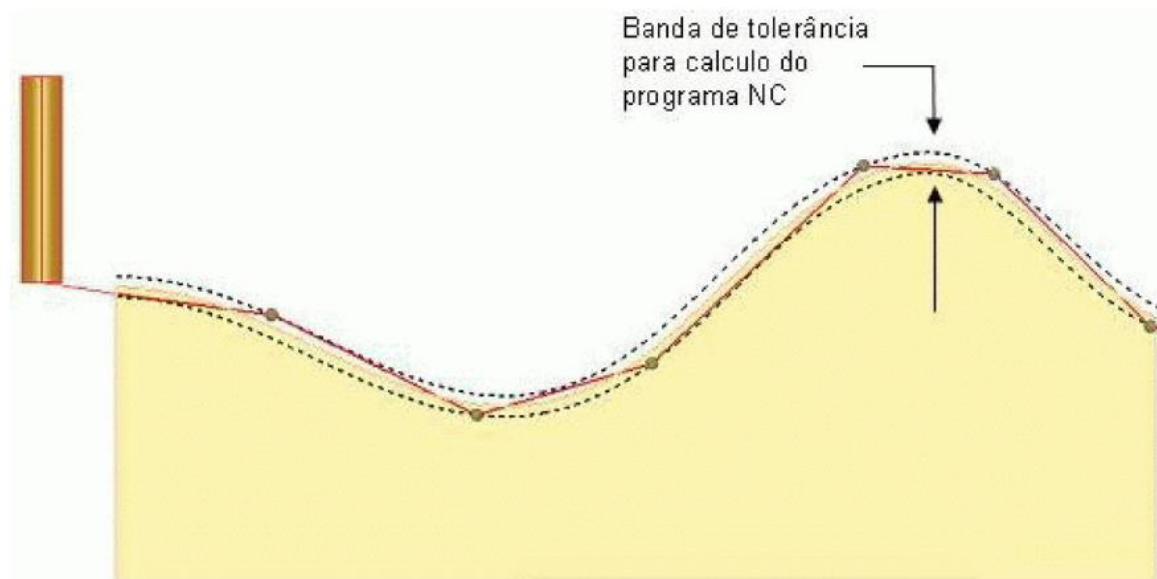


Figura 2.27 – Tolerância da trajetória da ferramenta.

Quanto menor a banda de tolerância, mais próximas estarão as trajetórias de ferramenta da superfície a ser maquinada e menores os segmentos de reta. Como já referido anteriormente os programas CNC possuirão maior volume de dados, pois mais linhas existirão no programa e esta característica poderá limitar as velocidades de avanço durante a maquinação, em especial de formas complexas. Conforme estudado por Souza (2004) e Souza e Coelho (2007), a máquina reduz a velocidade de avanço programada.

Segundo Chen e Ye (2002), a geração de trajetórias de ferramenta para superfícies complexas é um processo árduo e vem sendo estudado desde o início dos anos 80. Na maioria dos casos, a trajetória da ferramenta calculada por um sistema CAM é representada por pontos gerados ao longo do perfil a ser maquinado, como ilustra a figura 2.28. Posteriormente, os pontos calculados da trajetória são transformados no programa CNC. Para calcular os pontos da trajetória, o sistema CAM, inicialmente, calcula o ponto de contacto da ferramenta, *Cutter Contact* (CC), sobre a geometria CAD 3D. Empregando um método de compensação, calcula-se a localização da ponta central da ferramenta, a qual é denominada *Cutter Location* (CL). Os pontos CL são pontos contidos no programa CNC final.

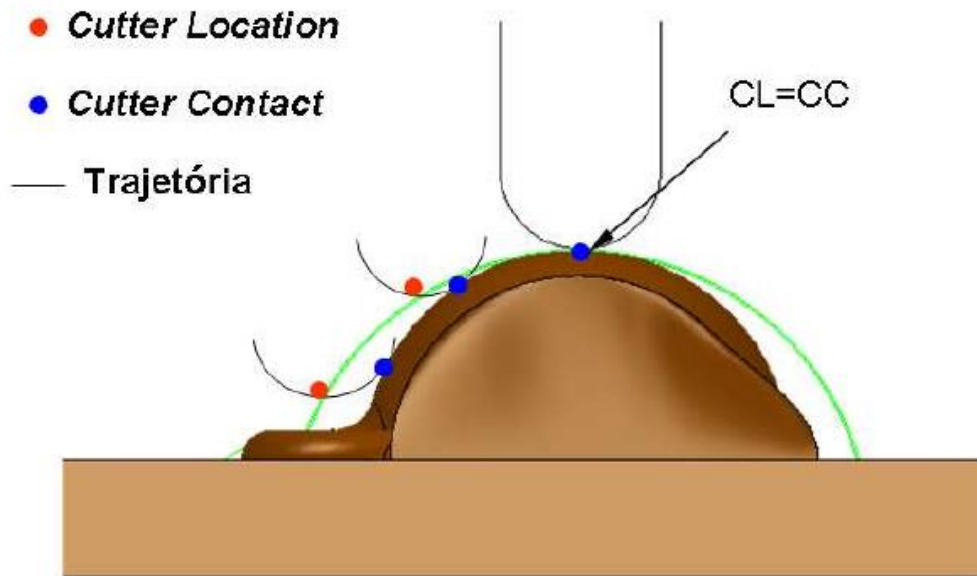


Figura 2.28 – Trajetória da ferramenta calculada por um sistema CAM (Arias e Souza, 2008).

O método tradicional para descrever uma trajetória de ferramenta para a maquinagem de uma superfície complexa é a interpolação linear de segmentos de retas, de acordo com a DIN 66025 (Dürr e Schünemman, 1999). O CAM ajusta a trajetória da ferramenta, dentro do *chord error* definido pelo programador. Quanto menor o limite de tolerância, mais próxima a ferramenta estará da geometria CAD. Deve-se notar que o *cutter contact* é o ponto que deve estar dentro desse limite de tolerância e não a trajetória da ferramenta ou o *cutter location*, como ilustra a figura 2.29.

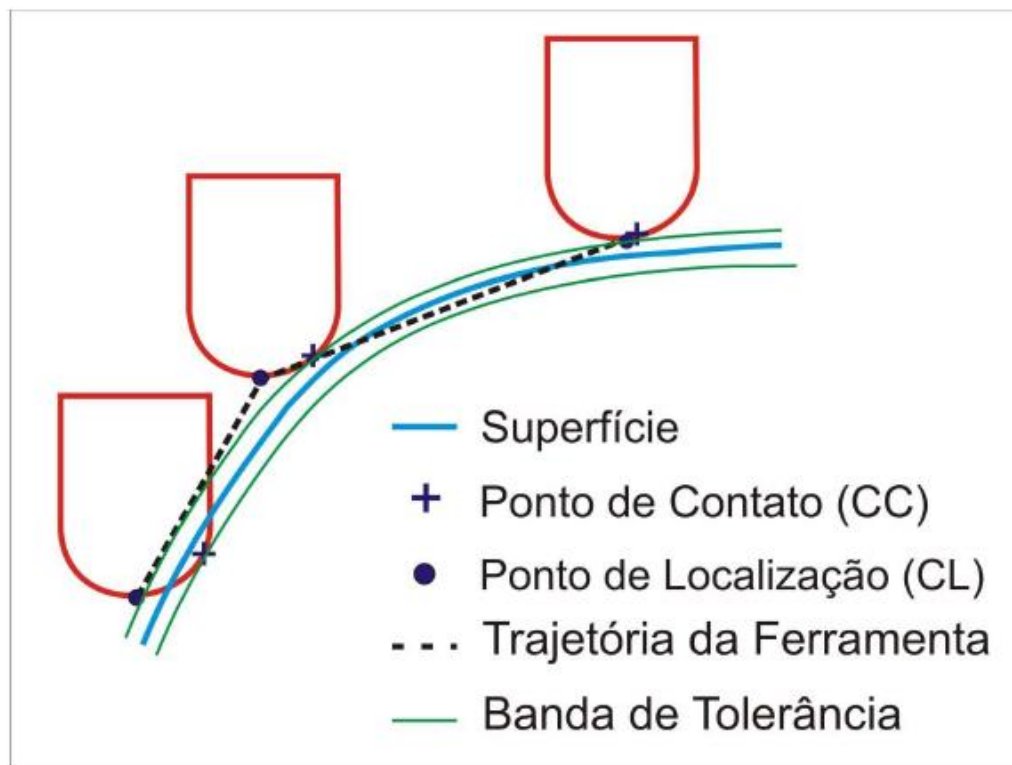


Figura 2.29 - Cálculo das trajetórias de ferramenta. (Arias e Souza, 2008).

2.4.5. PÓS-PROCESSAMENTO

Para a criação de programas NC utilizando um sistema CAM, o utilizador deverá possuir inicialmente o modelo em CAD a ser maquinado, definir as dimensões do bloco de matéria-prima, definir os parâmetros tecnológicos, e por fim, definir e calcular as trajetórias da ferramenta.

Após o cálculo do percurso da ferramenta realizado pelo *software* CAM, este deverá ser codificado em comandos, os quais possam ser interpretados e transformados pelo CNC da máquina em movimentações e acionamentos (Zelinski, 2001).

Cada máquina CNC possui características distintas, baseadas nas configurações da estrutura da máquina-ferramenta, envolvendo diferentes possibilidades para as movimentações dos seus eixos, troca de ferramentas, entre outras.

O cálculo inicial num sistema CAM gera um ficheiro CL e após esta etapa, o programa genérico deverá ser formatado de acordo com as características específicas do equipamento a ser utilizado. O pós-processador é o *software* que realiza esta conversão, transformando o arquivo CL num programa NC específico para uma dada comunicação máquina-ferramenta/CNC (Schultz, 1999). Assim sendo, dois elementos são necessários para o pós-processamento:

- ❖ Trajetória da ferramenta calculada pelo CAM em formato computacional;
- ❖ Pós-processador – *Software* que permite a transformação das coordenadas de movimento da trajetória da ferramenta, gerada pelo sistema CAM, numa linguagem que o comando numérico entenda e consequentemente serão transmitas para os eixos da máquina-ferramenta (Miralles, 2009), (Jung, Lee, Kim, & Mok, 2002) e (Bohez, 2002).

Desta forma, o pós-processador possibilita a utilização de qualquer arquivo CL para qualquer configuração de equipamento (máquina-ferramenta/CNC), desde que a configuração dos eixos da máquina e do arquivo CL seja compatível. A figura 2.30 esquematiza as etapas do pós-processamento, conforme descrito.

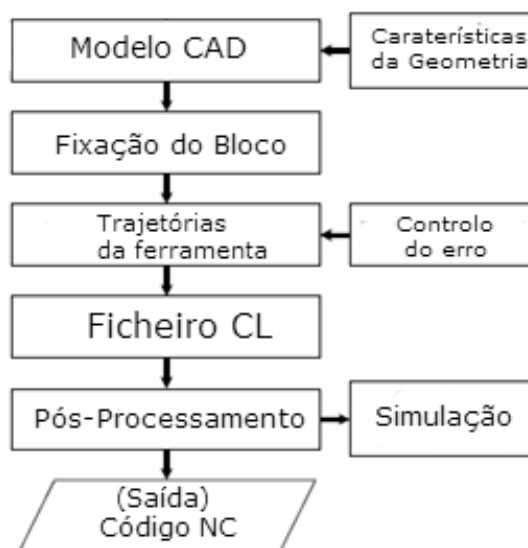


Figura 2.30 – Procedimentos da etapa de pós-processamento para a construção de programas NC.

3. ENGENHARIA INVERSA

3.1. GENERALIDADES

A evolução ocorrida nas metodologias utilizadas no projeto de produtos chegou a um ponto em que a criatividade foi substancialmente substituída pela cópia direta, com algumas modificações, de produtos já existentes. O processo de engenharia inversa caracteriza-se pela reprodução de um modelo físico, para que este se possa transformar num modelo original (Souza *et al*, 2009).

A Engenharia Inversa apresenta uma vasta gama de aplicações, como a área médica, entretenimento, património cultural, comércio web e, obviamente, engenharia. De um modo geral, todas estas aplicações podem tirar proveito, mas de diferentes formas, a partir do modelo 3D reconstruído virtualmente. A Engenharia Inversa é em parte utilizada quando o fabricante original de um produto já não o fabrica ou já não existe no mercado e o cliente necessita do referido produto ou quando a documentação original do desenho foi perdida ou é inexistente (Raja *et al*, 2008).

Nos últimos anos tem existido nas tecnologias de Engenharia Inversa uma grande evolução com a criação de equipamentos 3D, os quais permitem:

- Obter um modelo de CAD 3D da peça total ou parcial;
- Manipular os modelos para realizar modificações tais como, alterações de forma e mudança de escala, para obter a mesma peça com dimensões diferentes ou para compensar as contrações das materiais ocorridas no processo tecnológico de fabrico.

Em resumo, o método de Engenharia Inversa resulta na criação de um modelo CAD a partir de um objeto físico. É um processo complexo e exigente mas essencial em muitas indústrias uma vez que os modelos CAD adquiridos ajudam a melhorar a qualidade e eficiência de novos produtos além de tornar mais rápido o ciclo de desenvolvimento de um novo produto.

Como é possível constatar-se pelo diagrama da Figura seguinte, o processo produtivo através de Engenharia Inversa pode ser otimizado através do CAD e após essa etapa realizarmos o novo produto através do CAM, ou pode mesmo ser possível passar da Engenharia Inversa diretamente ao CAM.

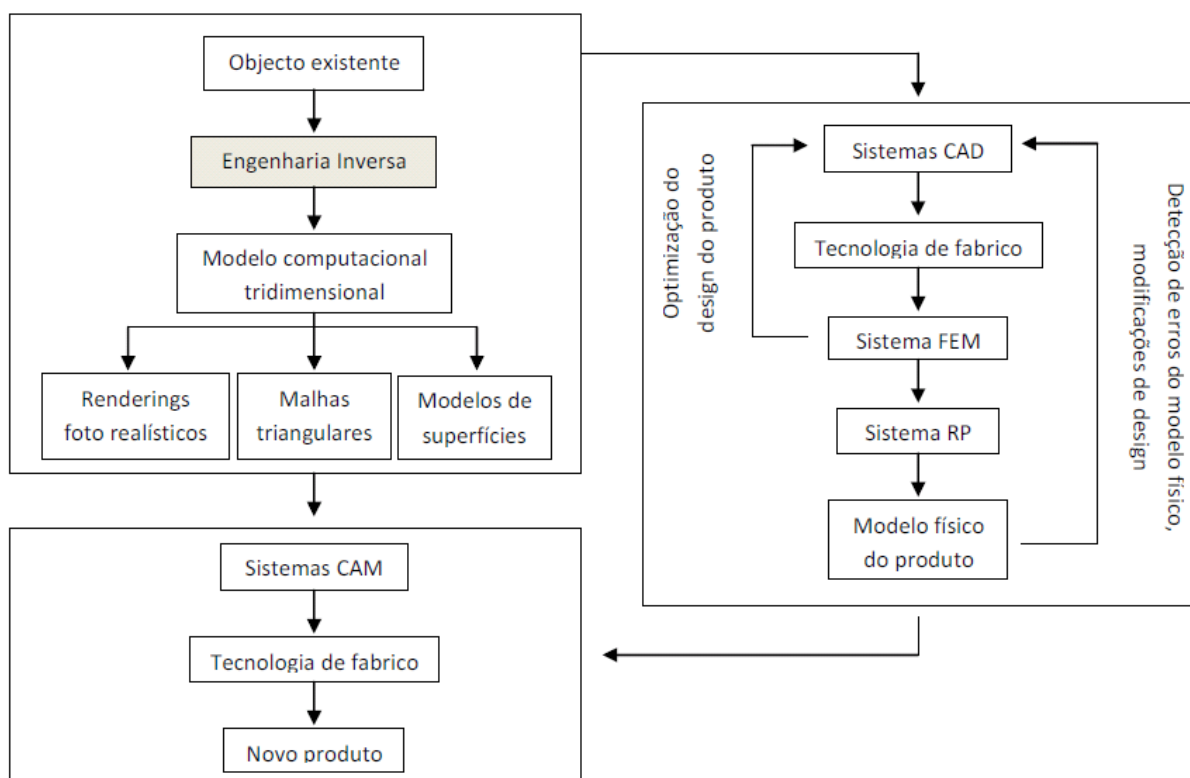


Figura 3.1 – Integração da Engenharia Inversa no Processo Produtivo (Gomes *et al*, 2013).

3.2. SISTEMAS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

Os equipamentos para aquisição de dados têm como objetivo capturar coordenadas de pontos em X, Y e Z de acordo com uma origem pré-estabelecida. Existem duas maneiras de capturar pontos de um modelo, por contacto físico e sem contacto físico.

No caso da aquisição de dados por contacto físico, um componente conhecido como apalpador, entra em contacto com a peça e copia o seu perfil para um equipamento conhecido como máquina de medir coordenadas (*measuring machine coordinates* – CMM), também conhecida como digitalização ponto a ponto é definida por uma varredura de dados coordenados e armazenados num arquivo de pontos. O princípio de funcionamento das medições com contacto por varrimento é em tudo semelhante, apenas difere na posição de referência que não é fixa. A tolerância típica neste tipo de *Scanners* varia entre 0.01 e 0.02 mm.

Nas medições sem contacto físico, os sistemas mais utilizados nos correntes dias são os de varredura por laser (figura 3.2), sendo esta uma nova tecnologia projetada para a medição de coordenadas tridimensionais de pontos numa superfície, baseada na emissão de um feixe de LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Este sistema funciona utilizando um feixe de laser projetado na direção dos objetos. Ao atingir a superfície dos objetos, parte do feixe é refletido na direção do sensor.



Figura 3.2 – Funcionamento do sistema de varredura por laser.

Os sistemas de varrimento por Laser dividem-se fundamentalmente em dois processos, *time-of-flight* (figura 3.3) e triangulação por feixe de laser (figura 3.4). Este método é baseado no sistema LADAR (*Laser detection and Ranging*), ou seja, detecção e medição de distância usando laser.

O *Time-of-flight* baseia-se na medição do tempo entre a emissão do feixe de laser e o seu retorno. Como podemos constatar pela figura seguinte o impulso de laser é enviado na direção do objecto (t_0), ao atingir a superfície do objecto parte do feixe é refletido na direção do sensor (t_1) e finalmente no sensor são medidos o tempo entre a emissão e retorno do feixe de laser, assim como a intensidade de retorno (t_2).

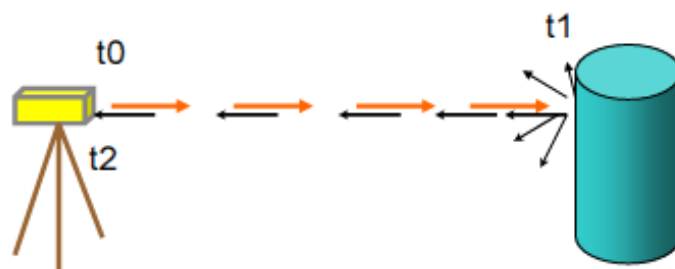


Figura 3.3 – Princípio da operação *time-of-flight*.

Segundo Souza *et al*, (2009), os sistemas de triangulação por feixe de laser são baseados no princípio da triangulação simples. Um feixe de laser é projetado sobre a superfície do objecto e é registado por uma ou mais câmaras de vídeo CCDs. O comprimento entre a base e a origem do laser é fixo e conhecido a partir da calibração. A distância entre o objeto e o equipamento é geometricamente determinada pelo ângulo registado e o comprimento da base. Estes *Scanners* têm uma tolerância que habitualmente varia entre 0.025 e 0.2 mm.

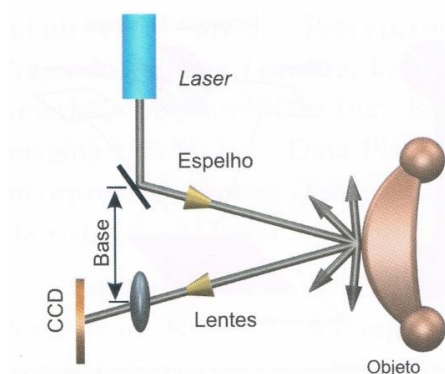


Figura 3.4 – Princípio da operação de triangulação por feixe de laser (Boehler, 2001).

3.3. TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS

As principais etapas de digitalização podem-se considerar a aquisição de dados, criação de uma malha poligonal única, tratamento e suavização da malha poligonal.

A aquisição de dados durante o processo de digitalização pode ser feita apenas numa digitalização ou em mais do que uma, já que o ângulo de atuação do equipamento pode ou não cobrir toda a superfície do modelo de uma vez só. O resultado desta etapa é de uma densa nuvem de pontos, podendo por vezes ser dividida em vários planos.

Depois de todos os pontos devidamente alinhados inicia-se a criação de uma malha poligonal única, iniciando-se para isso um processo de união e redução de regiões sobrepostas. As vistas são unidas num modelo único, ficando com sua malha simplificada (figura 3.5).

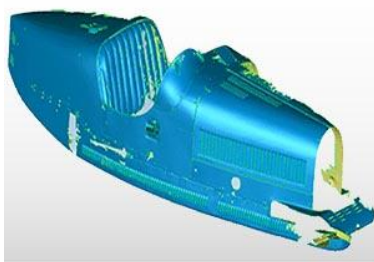


Figura 3.5 - Aspeto de uma malha não tratada no *software* GEOMAGIC®.

Na etapa de tratamento e suavização da malha poligonal, o utilizador modifica a composição da digitalização, é necessário muito cuidado para não eliminar ou acrescentar regiões que não correspondam ao modelo original. O ideal seria apenas preencher as falhas ou furos da malha e apagar os ruídos, ou seja, aquelas regiões que são digitalizadas, mas que não fazem parte do modelo original (figura 3.6).

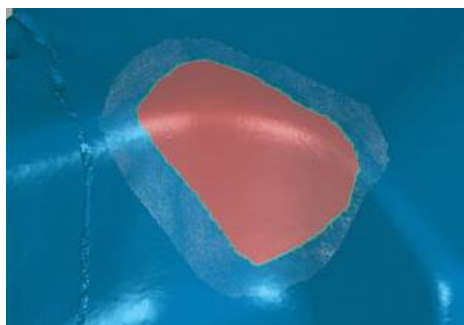


Figura 3.6 – Preenchimento de falha na malha.

Existem erros dimensionais, como ruídos e erros de calibração que podem ser eliminados sem destruir a geometria do objeto. Para isso a malha deve passar pela etapa de suavização, que consiste em reconstruir a malha considerando um desvio médio entre os pontos que fazem parte de uma determinada região (figura 3.7).



Figura 3.7 – Aspeto de escultura depois de sujeita ao tratamento e suavização da malha.

4. TRABALHO EXPERIMENTAL

De modo a aplicar os conhecimentos adquiridos, foram realizados dois trabalhos experimentais que se descrevem em seguida. O primeiro trabalho consistiu em produzir um componente mecânico a partir de um modelo CAD desenhado a duas dimensões (2D). Para o efeito, utilizou-se o *software* MASTERCAM® X6 para definir os ciclos de maquinagem e criar o código CNC. O trabalho foi produzido num centro de maquinagem de 3 eixos, partindo de um bloco em material polimérico comercial (Necuron 1001), adequado para produzir protótipos com um tempo reduzido de maquinagem. Posteriormente, utilizando para o efeito um scanner laser, foi realizada a aquisição da nuvem de pontos que definem a geometria do componente, sendo manipulada a informação com *software* adequado, de modo a criar um modelo CAD tridimensional.

No segundo trabalho, o procedimento foi semelhante, tendo sido utilizados os mesmos programas informáticos e equipamentos. Neste caso, o modelo inicial CAD é representado a três dimensões (3D) e, por conseguinte, foram utilizados ciclos de maquinagem do MASTERCAM® vocacionados para modelos CAD 3D. O fabrico deste componente foi efetuado a partir de um bloco inicial de uma liga de alumínio e realizada a aquisição da nuvem de pontos por engenharia inversa, de modo a efetuar uma comparação dimensional entre o modelo CAD inicial e o componente produzido.

4.1. EQUIPAMENTO UTILIZADO

Para a realização do Trabalho Experimental procedeu-se à realização dos ciclos de maquinagem recorrendo ao *software* MASTERCAM®, cujo layout inicial é apresentado na figura 4.1.

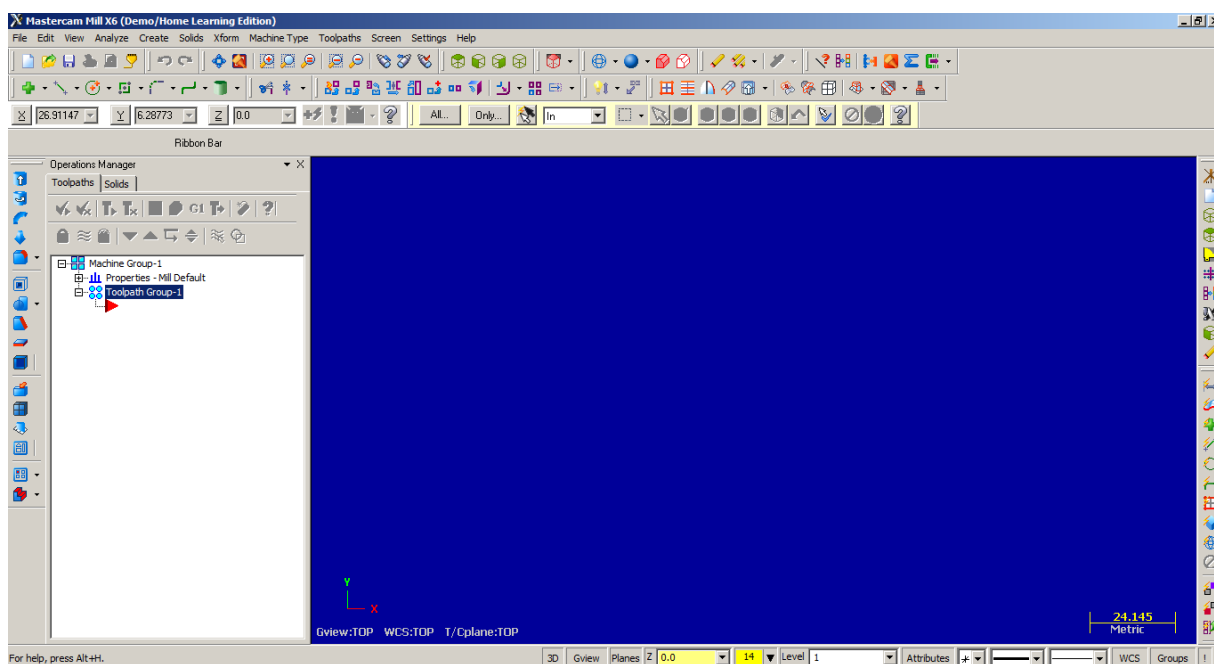


Figura 4.1 – Ambiente de Trabalho do MASTERCAM®.

Este trabalho experimental foi realizado como já referido anteriormente no Centro de Maquinagem do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEC. Este é da marca LEADWELL, modelo GMC 600, com um controlador FANUC Series O-M. O equipamento possui três eixos, possuindo uma capacidade de deslocamento de 600 mm no eixo X, 650 mm no eixo Y, e 350 mm no eixo Z (figura 4.2 - a). A potência fornecida pelo eixo-árvore é de 3.3 a 5.7 kW para uma rotação máxima do fuso de 6000 rpm. Para se referenciar o bloco de material na mesa da máquina (zero peça), usou-se um apalpador digital 3D DIGIGRAPH (com uma esfera calibrada de 2 mm de diâmetro) de resolução 0,005 mm, e capacidade de medida de ± 2 mm em X, Y e Z (figura 4.2 - b).



(a)



(b)

Figura 4.2 – Visualização de algum do equipamento adotado: Centro de maquinagem utilizado (a); Palpador digital 3D (b).

4.2. EXEMPLO 1 - TRABALHO 2D

4.2.1 GEOMETRIA CAD

Na fase inicial deste trabalho realizou-se a geometria CAD no *software* AUTOCAD® a 2D. Considerou-se que se deveria realizar esta peça de forma a posteriormente a maquinarmos com dois apertos, ou seja, seria necessário realizar duas vistas (vista superior e vista inferior).

A peça em causa possui comprimento de 145 mm e largura de 95 mm, furos passantes, furos roscados, diversas formas geométricas, um sulco lateral e a maioria das arestas chanfradas (figura 4.3).

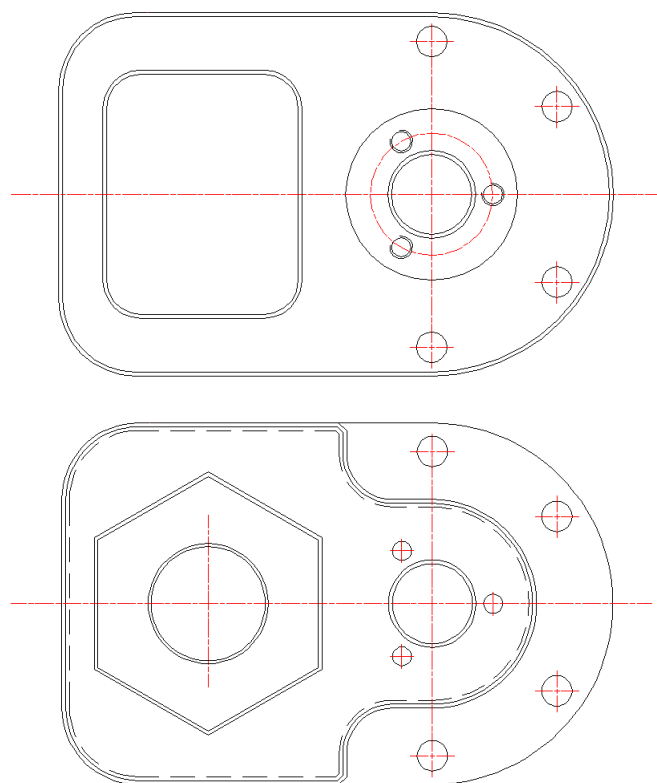


Figura 4.3 – Vista inferior e superior do Exemplo 1 - Trabalho 2d.

A geometria em causa encontra-se apresentada em anexo devidamente cotada e com as respetivas vistas representadas.

4.2.2. PROGRAMAÇÃO DOS CICLOS DE MAQUINAGEM E RESULTADO OBTIDO

Nesta primeira fase do trabalho realizou-se a importação das Geometrias elaboradas em AUTOCAD® para o MASTERCAM® (figura 4.4)

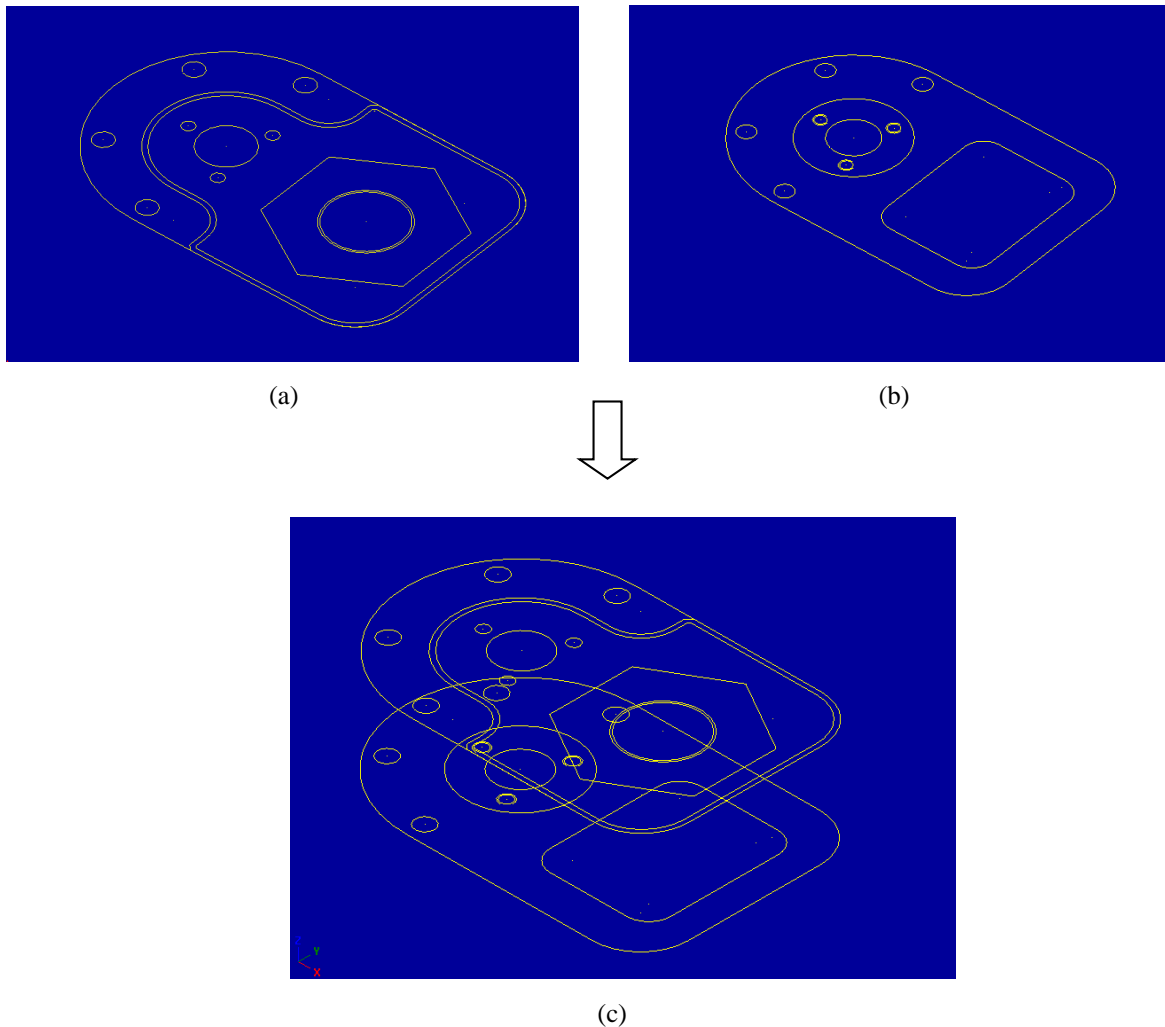


Figura 4.4 – Importação das geometrias CAD para o MASTERCAM®: Importação da vista superior (a); Importação da vista inferior (b); Apresentação de ambas as vistas implementadas segundo valores de cota no eixo Z diferentes (c).

A segunda fase do trabalho diz respeito à definição das dimensões do bloco virtual a considerar na simulação da maquinagem (*Stock-Setup*). Este foi definido com as mesmas dimensões do bloco inicial em poliuretano, que mais tarde iria ser implementado no centro de maquinagem. Optou-se por realizar um *Stock Setup* retangular com as dimensões de 150x100x50 mm, com a implementação de uma caixa delimitadora com um aumento de 5 mm, segundo os eixos X e Y (figura 4.5).

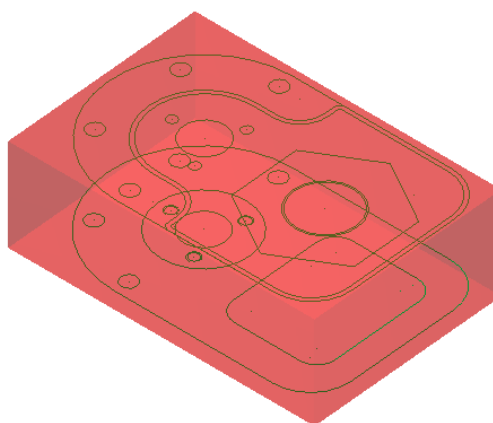
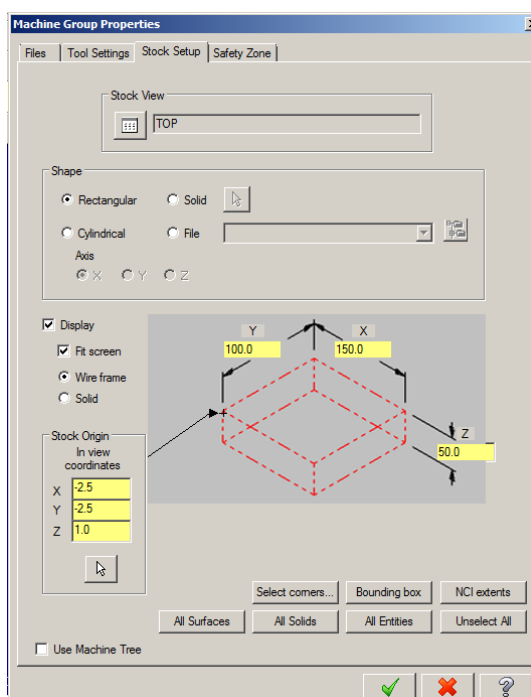


Figura 4.5 – Criação do *Stock Setup*.

Posicionou-se o zero peça do 1º Aperto num dos cantos da parte superior do *Stock* com uma altura inferior segundo Z de 1 mm e segundo X e Y de -2.5 mm (figura 4.6 - a). O zero peça do 2º Aperto foi posicionado com uma altura inferior segundo Z de 6 mm e segundo X e Y de -2.5 mm (figura 4.6 - b).

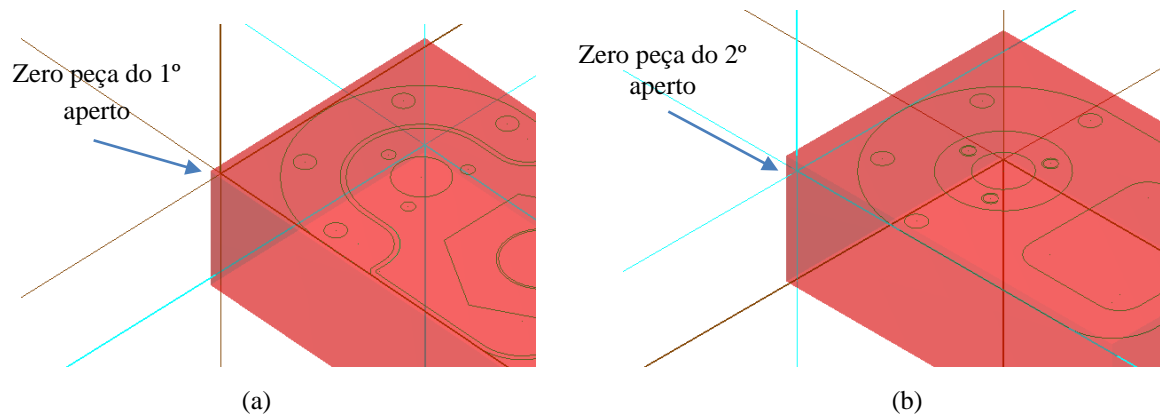


Figura 4.6 – Definição dos zero peça: Zero peça do 1º Aperto (a); Zero peça do 2º Aperto (b).

Na figura seguinte apresentam-se todas as ferramentas utilizadas nos ciclos que serão apresentados em seguida.



Figura 4.7 – Ferramentas utilizadas na maquinação do trabalho 2D.

Tabela 4.1 – Ferramentas Utilizadas.

Número da Ferramenta utilizada	Descrição
1	Roca de 50 mm
2	Fresa de topo plano de 4 gumes de 12 mm
3	Broca helicoidal de 8 mm
4	Broca helicoidal de 5 mm
5	Macho M6 direito
6	Ferramenta de Chanfrar de 45° (8 mm de diâmetro na parte superior)
7	Fresa cónica com 3° de inclinação (Na sua parte inferior tem \varnothing 6 mm)
8	Fresa de Disco de \varnothing 17,7 mm

Tabela 4.2 - Parâmetros de corte para maquinagem do trabalho 2D.

Número da Ferramenta utilizada	N.º de Gumes de Corte	Velocidade de Corte [m/min]	Avanço por dente [mm/dente]	Velocidade de rotação [rpm]	Velocidade de corte XY [mm/min]	Velocidade de corte Z [mm/min]
1	4	150	0,375	955	1433	717
2	4	150	0,10	3979	1592	796
3	-	60	0,10	2387	-	239
4	-	60	0,08	3820	-	307
5	-	-	-	100	-	-
6	4	150	0,06	5968	1432	716
7	4	150	0,12	3673	1763	882
8	3	150	0,13275	2698	1074	537

4.2.2.1. 1º APERTO

Após a criação do primeiro *Toolpath Group* (Aperto 1), foi necessário criar os Ciclos de Maquinagem.

De uma forma genérica os ciclos para trabalhar a 2D em que a altura de maquinagem (Z) é constante podem ser divididos da seguinte forma:

- *Standard - Contour* (Contorno), *Drill* (Furação), *Pocket* (Caixa), *Face* (Facejamento) e *Engraving* (Gravação) - Estes ciclos apresentam a particularidade de a largura de corte ser sempre constante;
- *2D High Speed* - nestes ciclos a largura de corte é variável e adapta-se à geometria da peça, reduzindo os tempos de trabalho em vazio.

Optou-se por trabalhar com os ciclos *standard*, os quais irão em seguida ser detalhados em grupos de quatro, por uma questão de favorecer a compreensão do leitor. Nesta primeira fase apresentam-se os quatro primeiros Ciclos (1º, 2º, 3º e 4º):

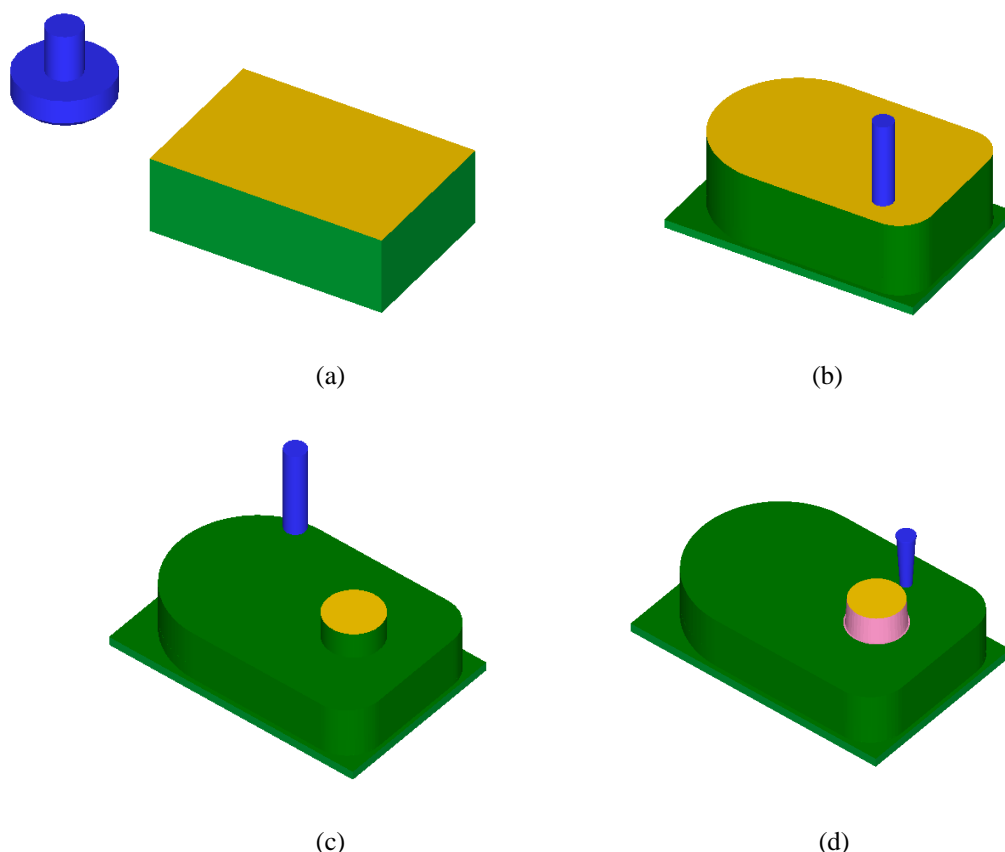


Figura 4.8 – Simulação dos primeiros quatro Ciclos de Maquinagem relativos ao 1º Aperto: Facejamento de 1 mm com a estratégia *Face* (a); Contorno exterior em rampa até - 44 mm utilizando a estratégia *Contour (Ramp)* (b); Desbaste da superfície horizontal mantendo o cilindro, utilizando a estratégia *Pocket (Facing)* (c); Execução de cone com 3° de inclinação, partindo do cilindro anterior utilizando uma fresa com inclinação de 3° e estratégia *Contour (Ramp)* (d).

Nestes primeiros quatro ciclos do 1º aperto, inicialmente utilizou-se uma estratégia de *Face* (figura 4.8 - a), realizando um facejamento de 1 mm, e utilizando para o efeito uma Roca de 50 mm (figura 4.7 - ferramenta 1).

No segundo ciclo realizou-se uma estratégia de *Contour (Ramp)*, ou seja, a realização de um contorno exterior em rampa utilizando multipasses. Como é possível constatar-se na figura 4.8 - b, deixou-se uma base de 6 mm para que a prensa continuasse a ter uma base de apoio e também para que fosse mais fácil o apoio no 2º Aperto. Utilizou-se neste segundo ciclo uma fresa de topo plano de 4 gumes de 12 mm (figura 4.7 - ferramenta 2).

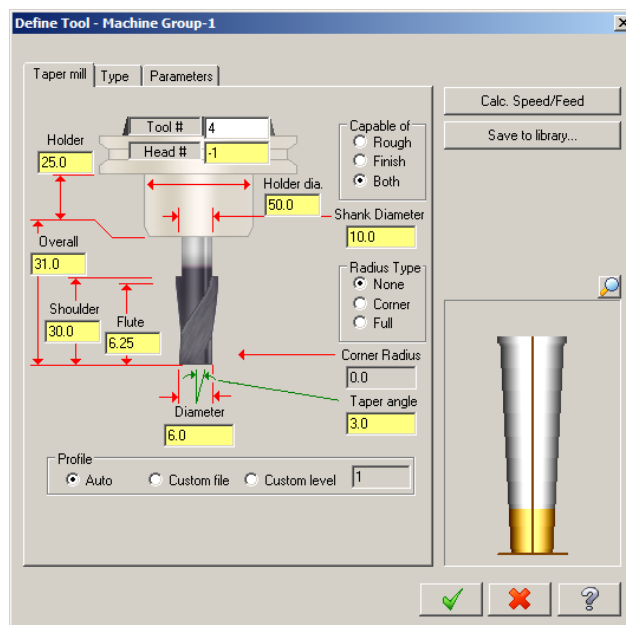
No terceiro ciclo de maquinação utilizou-se a estratégia de *Pocket (Facing)* (figura 4.8 - c), acabando esta estratégia por ser um desbaste da superfície, permanecendo nesta face um cilindro com 31,57 mm de altura e 15 milímetros de diâmetro. É importante referir que neste ciclo foi utilizada a estratégia *Roughing* (Desbaste) com o método de corte de *Parallel Spiral*, *Clean Corners*, ou seja, a ferramenta executa um movimento de Espiral Paralela às entidades seleccionadas e limpeza de cantos.



Figura 4.9 – Opção utilizada na Terceiro ciclo de Maquinagem do 1º Aperto

A ferramenta utilizada foi a mesma da operação anterior, ou seja, uma fresa de topo plano, de quatro gumes, de 12 mm.

Finalmente na quarta operação foi utilizada novamente uma estratégia de *Contour (Ramp)* (figura 4.8 - d), para realizar o cone com 3° de inclinação, partindo do cilindro referido no parágrafo anterior. Foi utilizada para a realização desta operação uma fresa cônica com 3° de inclinação e com um diâmetro na sua parte inferior de 6 mm, conforme pode ser observada na figura 4.10.



(a)



(b)

Figura 4.10 – Fresa cônica com 3° de inclinação utilizada no 4º Ciclo de maquinagem para realização do cone: Definição no MASTERCAM® (a); Fresa cônica utilizada (b).

Na figura seguinte apresentam-se as imagens dos próximos quatro ciclos (5º, 6º, 7º e 8º) de maquinagem:

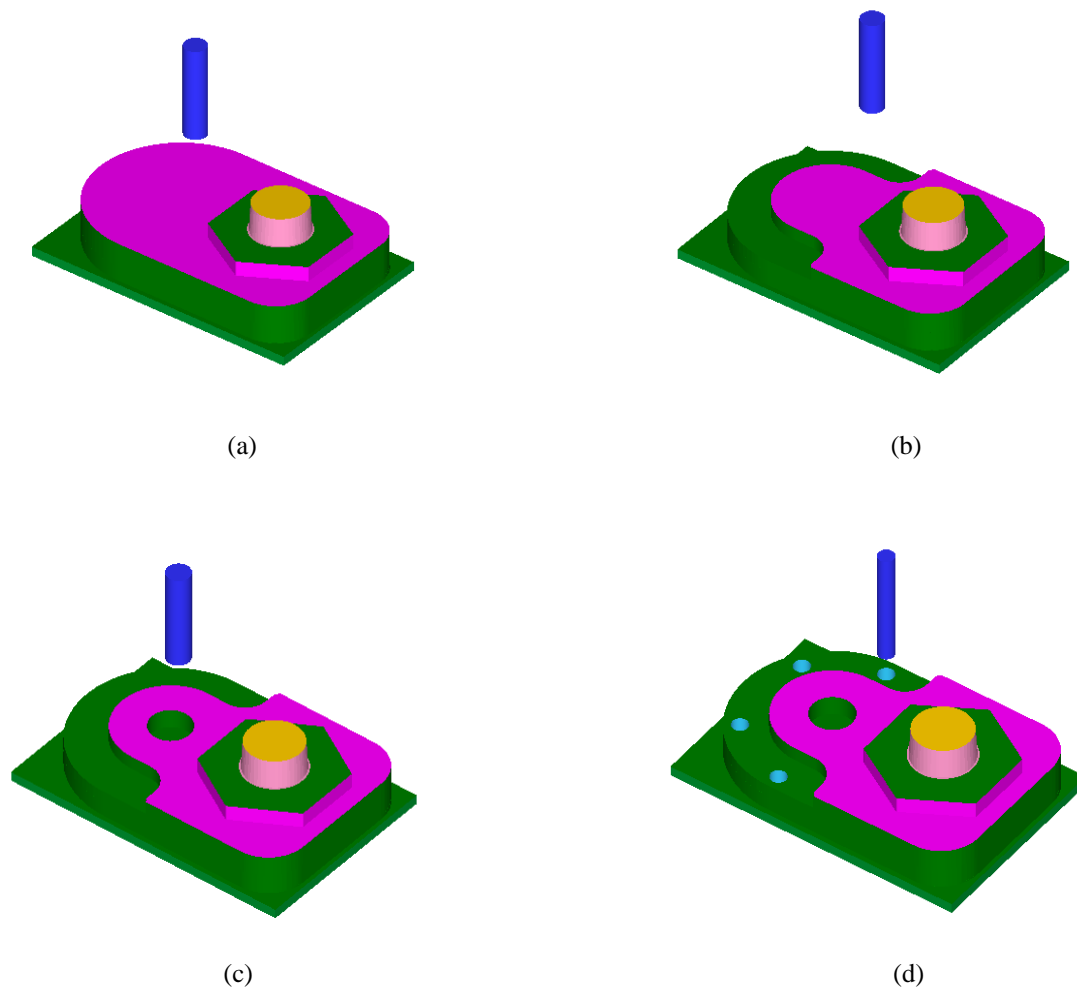


Figura 4.11 – Simulação do segundo grupo de quatro Ciclos de maquinagem relativos ao 1º Aperto: Desbaste mantendo hexágono com a estratégia *Pocket (Facing)* (a); Desbaste permanecendo parte de uma superfície cilíndrica com a estratégia *Pocket (Facing)* (b); Realização de furo central de 21 mm de diâmetro, utilizando a estratégia *Pocket (Standard)* (c); Realização de 4 furos de 8 mm de diâmetro com a estratégia *Peck Drill* (d).

No quinto Ciclo de Maquinagem do 1º Aperto optou-se por utilizar uma estratégia de *Pocket (Facing)* para proceder à execução do hexágono da figura 4.11 - a, assim foi executado um desbaste de 8 mm de profundidade, mantendo desta forma um hexágono com 60 mm de largura.

Foi utilizada a estratégia *Roughing* tal como no terceiro ciclo de maquinagem com a opção *Parallel Spiral, Clean Corners*. Para o efeito recorreu-se à mesma fresa já utilizada nalgumas operações anteriores, fresa de topo plano de quatro gumes e 12 mm de diâmetro (figura 4.7 - ferramenta 2).

Em relação ao 6º Ciclo de Maquinagem (figura 4.11 – b), foi da mesma forma utilizada uma estratégia de *Pocket (Facing)* assim como a mesma ferramenta do Ciclo anterior. Apenas as entidades geométricas que delimitam a área de corte (*chains*) foram alteradas em relação à operação do parágrafo anterior, assim como os *Linking Parameters* (Parâmetros de Altura), como se pode visualizar na figura seguinte.

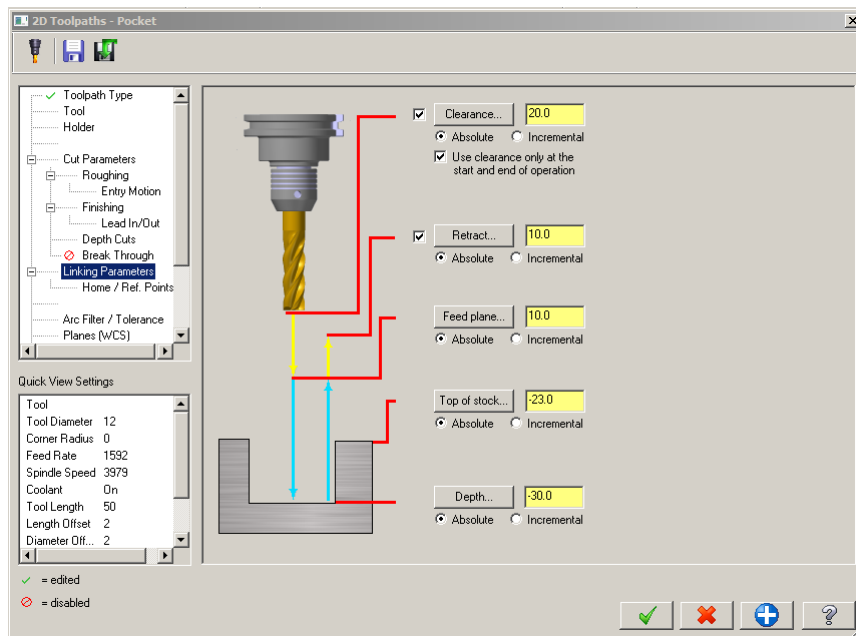


Figura 4.12 – *Linking Parameters* do Ciclo de Maquinagem *Pocket (Facing)* (figura 4.11 – b)

É ainda importante referir que neste Ciclo foi utilizada a estratégia *Roughing* mas com uma opção diferente das anteriores, sendo neste caso utilizado um método de corte do tipo *True Spiral*, ou seja, uma autêntica espiral, como se pode constatar pelo icone seguinte retirado do MASTERCAM®:



Figura 4.13 – Opção utilizada no sexto ciclo de Maquinagem do 1º Aperto (figura 4.11 – b)

O furo de 21 mm de diâmetro e 10 mm de altura da operação da figura 4.11 – c, foi realizado com movimentos de fresagem, utilizando uma estratégia de *Pocket (Standard)*. Foi ainda utilizada para o efeito a mesma ferramenta das operações anteriores e com a estratégia *Roughing* e o método de corte do tipo *True Spiral*.

Para realizar a furação (figura 4.11 - d), foi utilizada uma estratégia de *Peck Drill* (Furação com quebra de apra com recuo para limpeza) e foi utilizada para o efeito uma broca de 8 mm.

Para conclusão dos ciclos do 1º Aperto, apresenta-se na figura 4.14, os próximos quatro ciclos (9º, 10º, 11º e 12º) de maquinagem:

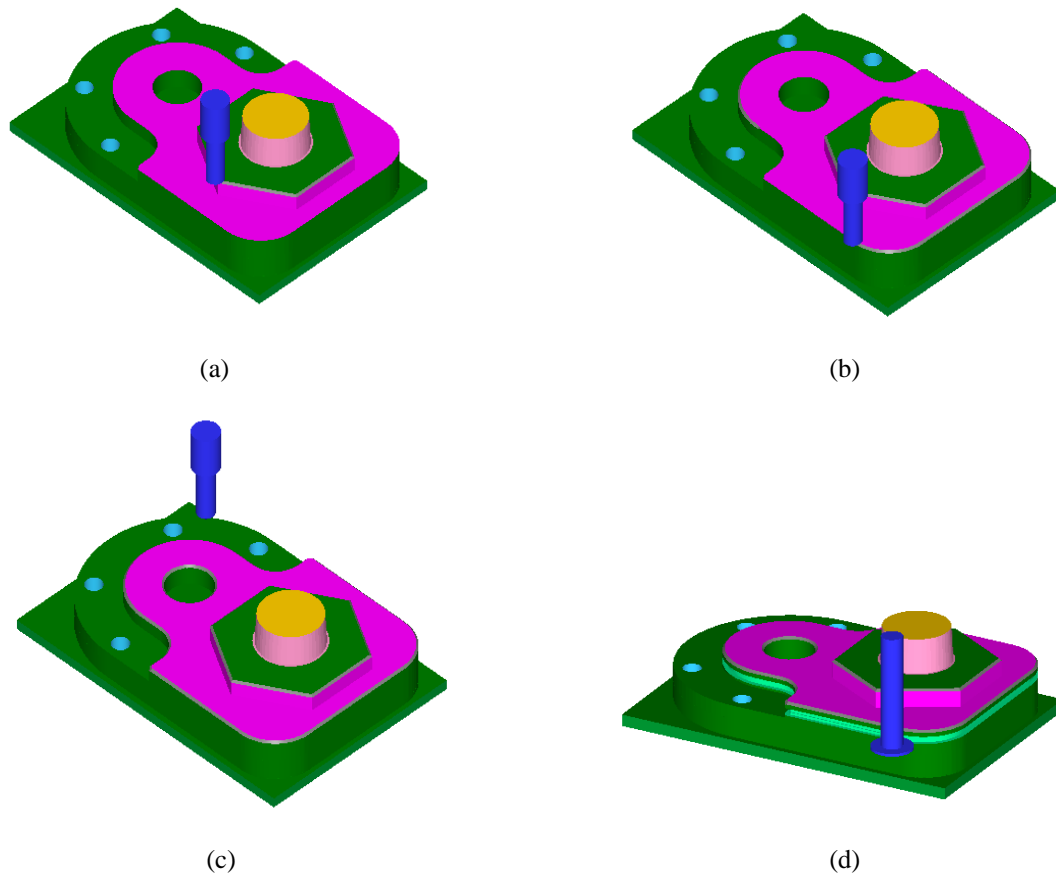


Figura 4.14 – Simulação do terceiro grupo de quatro Ciclos de Maquinagem relativos ao 1º Aperto: Realização de chanfro utilizando a estratégia *Contour (2d Chanfer)* (a, b e c); Realização de Ranhura Lateral utilizando a estratégia *Contour 2D* (d).

O 9º, 10º e 11º Ciclos de Maquinagem (figura 4.14 – a, b e c) correspondem à realização de um Chanfro de 1 mm x 45° nas arestas do hexágono, da superfície representada com a cor lilás e do furo de 21 mm de diâmetro, para isso foram utilizadas três operações de *Contour (2d Chanfer)*. Para a realização destes três chanfros utilizou-se a ferramenta que se encontra representada na figura 4.15.

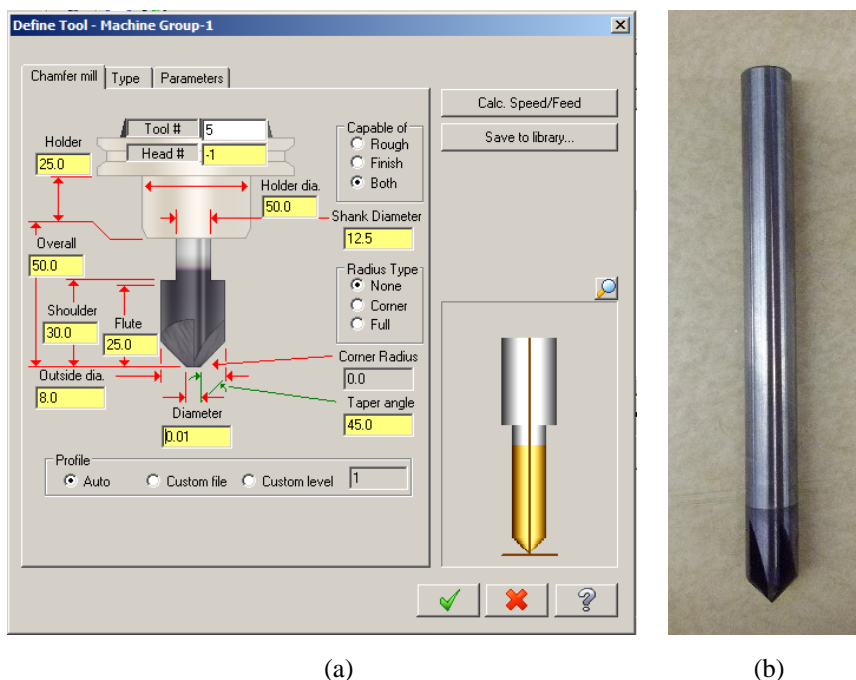


Figura 4.15 – Definição no MASTERCAM® da Ferramenta de Chanfrar (a); Ferramenta de Chanfrar utilizada (b).

Finalmente no 12º Ciclo de Maquinagem deste 1º Aperto (figura 4.14 – d) realizou-se um sulco lateral com 3 mm de altura e 2 mm de profundidade. Utilizou-se neste ciclo uma estratégia de *Contour (2D)* e uma fresa de disco com 17,7 mm de diâmetro e 1,19 mm de espessura.

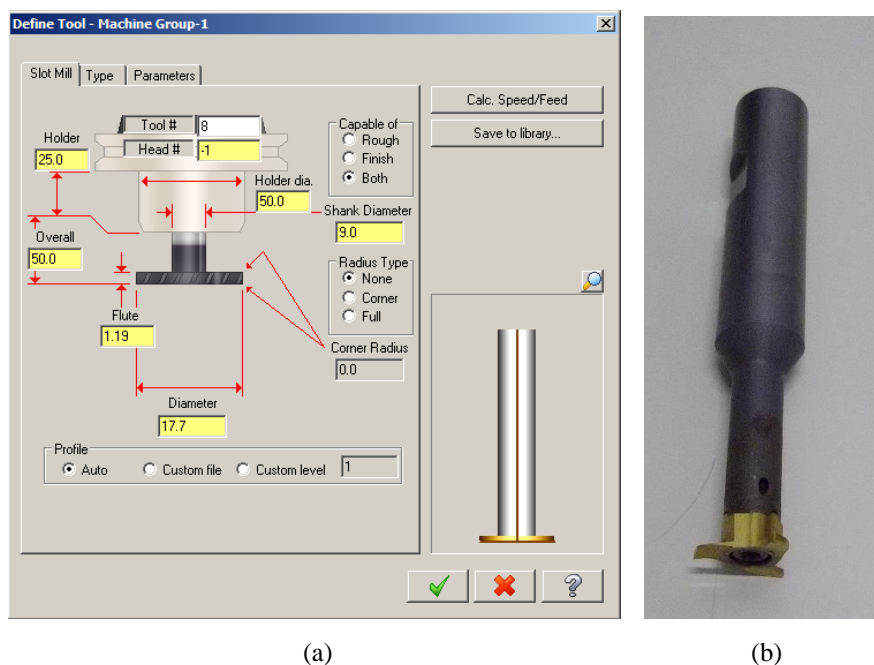


Figura 4.16 – Definição no MASTERCAM® da Fresa de disco: Definição no MASTERCAM® (a); Fresa de disco utilizada (b).

Nas imagens seguintes apresentam-se diferentes etapas das operações de maquinagem executadas no 1º aperto.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.17 – Diferentes etapas de maquinagem relativas ao 1º Aperto

Na maquinagem do 1º Aperto foram detetados alguns defeitos na peça, especialmente na zona das arestas, provocados em grande maioria pelo lascamento do material durante o corte. Tal efeito não aconteceria se o material a maquinar fosse metálico.

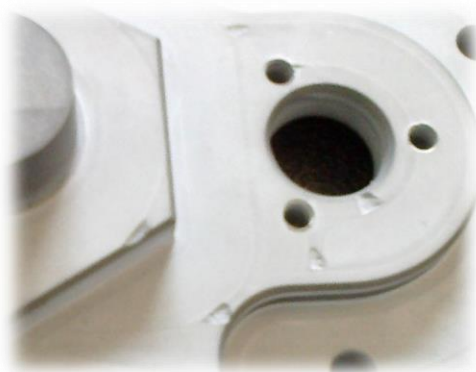


Figura 4.18 – Defeitos encontrados na maquinagem do 1º Aperto

4.2.2.2. 2º APERTO

Como foi referido anteriormente, esta peça para ser realizada necessita de ser virada para ser maquinada do lado contrário, a esta alteração chamou-se de 2º Aperto. A figura 4.19 mostra-nos o lado da peça que irá desta vez ser maquinado.

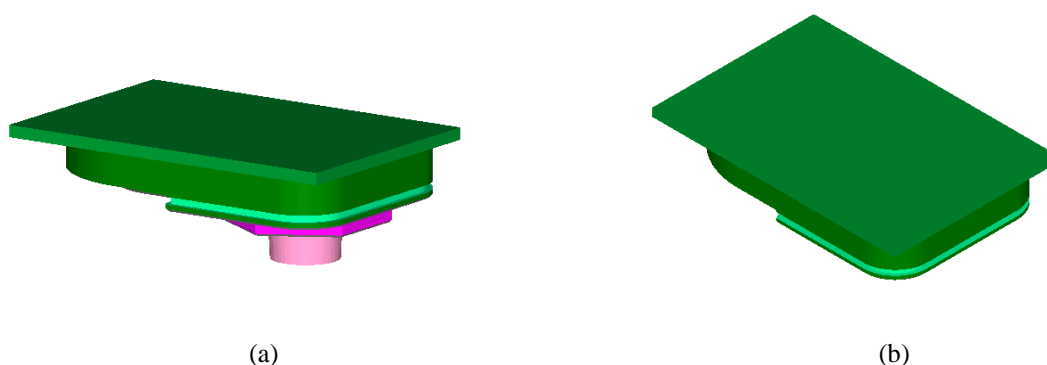


Figura 4.19 – Perspetiva do lado contrário ao 1º aperto da peça que irá ser maquinada (2º Aperto)

Neste segundo aperto foi criado um novo *Toolpath Group* designado por Aperto 2, de modo a que os ciclos agora criados ficassem agrupados dentro deste grupo. Neste novo grupo foram criadas sete operações de maquinagem. Para uma melhor compreensão do leitor dividiram-se em grupos os ciclos. Assim, apresentam-se em seguida os primeiros três ciclos de maquinagem do 2º Aperto.

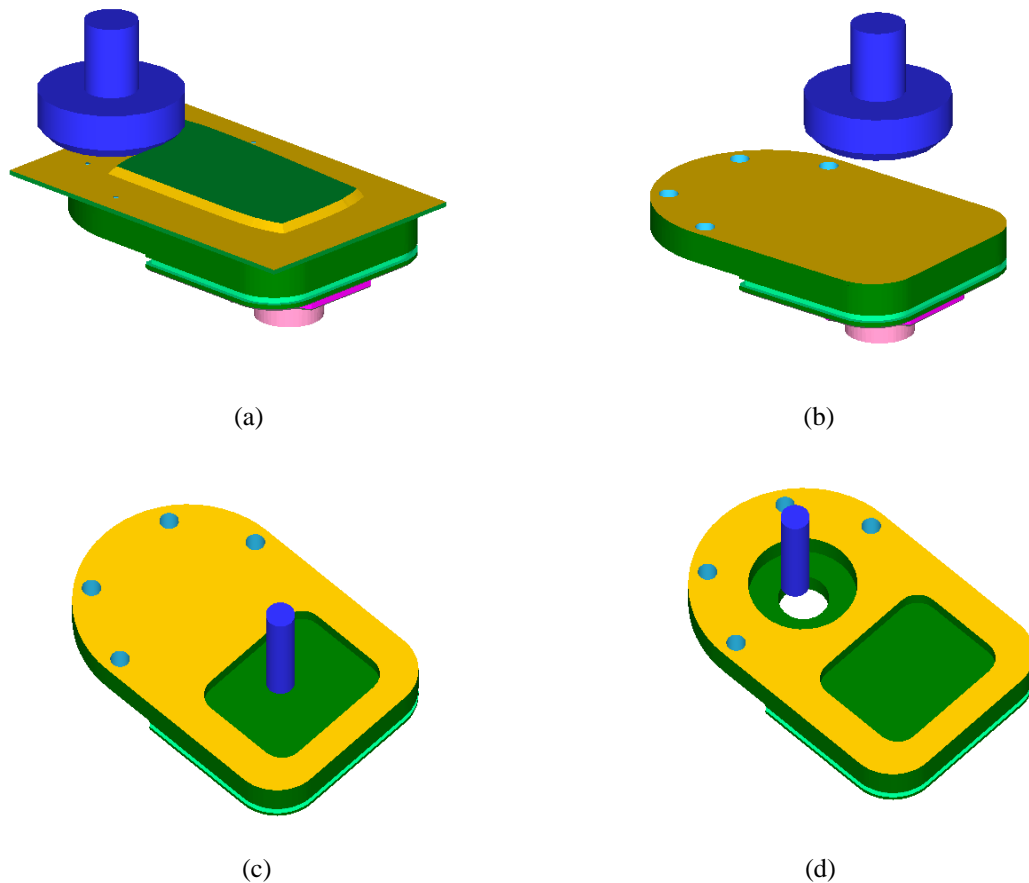


Figura 4.20 – Simulação do primeiro grupo de três Ciclos de Maquinagem relativos ao 2º Aperto: Facejamento com o ciclo *Face* (a e b); Realização de caixa rebaixada com a estratégia *Pocket (Standard)* (c); Execução do furo por fresagem utilizando a estratégia *Pocket (Standard)* (d).

Nesta fase do trabalho (2º Aperto) foi necessário em primeiro lugar, como se pode constatar pela figura 4.20 – a e b, facejar os 6 mm que foram deixados em excesso no 1º Aperto, motivado pela necessidade de servir de base de aperto nessa altura. Foi utilizada uma estratégia de *Face* e uma Roca de 50 mm de diâmetro (figura 4.7 – ferramenta 1).

Em seguida como é possível observar-se na figura 4.20 - c e d, realizou-se uma caixa e um furo através da estratégia *Pocket (Standard)*. A caixa foi realizada com uma profundidade de 6 mm e o furo com um diâmetro de 45 mm e uma profundidade de 10 mm. Em ambas estas duas últimas operações foi utilizada uma fresa de topo plano de 12 mm de quatro gumes (figura 4.7 - ferramenta 1), tendo esta sido já utilizada em algumas operações do 1º Aperto.

Na figura 4.21, apresentam-se os últimos quatro ciclos de maquinagem do 2º Aperto.

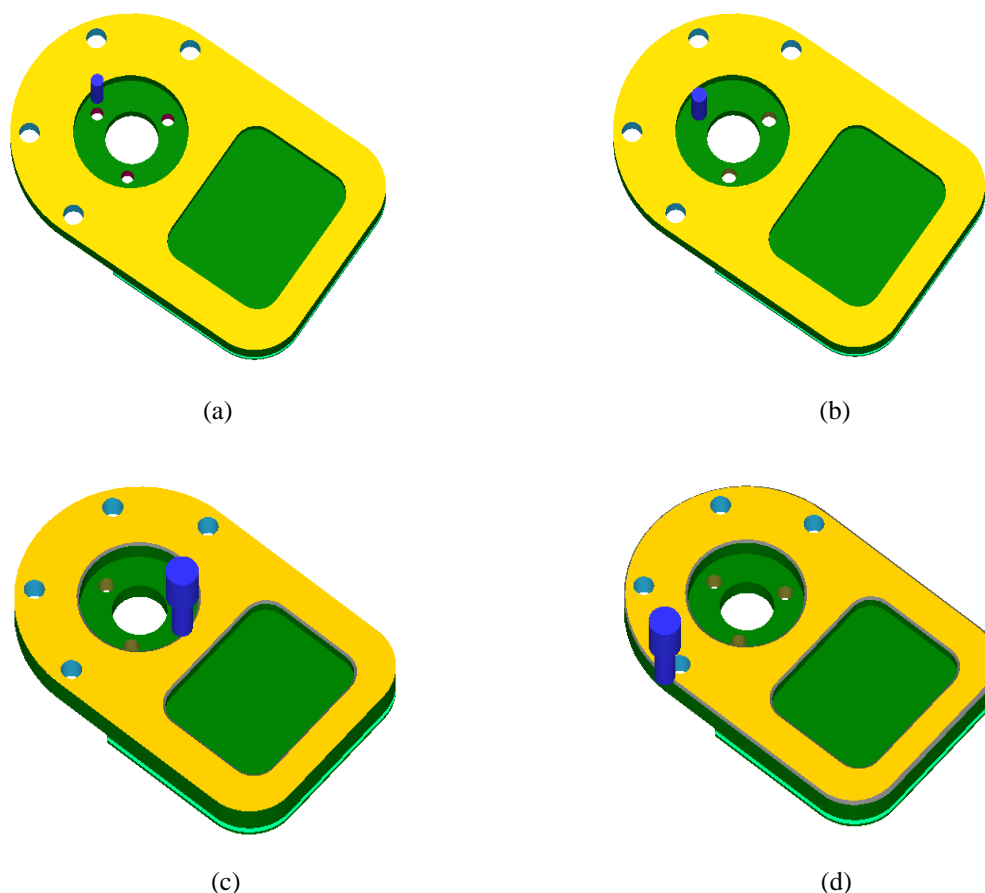
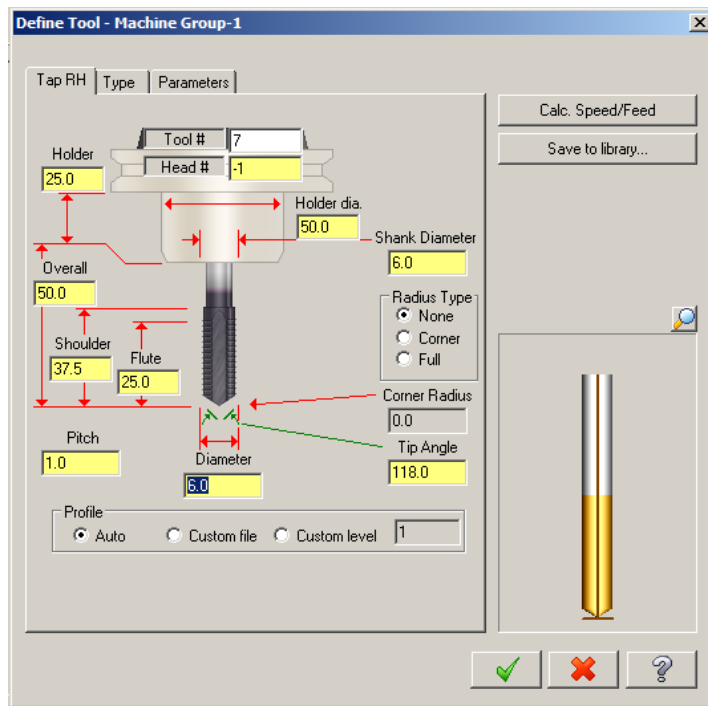


Figura 4.21 – Simulação do segundo e último grupo de quatro Ciclos de Maquinagem relativos ao 2º Aperto: Realização de 3 furos passantes executados por passagens com a estratégia *Peck Drill* (a); Roscagem com Macho M6 direito dos 3 furos anteriores com a estratégia *Tap RH* (b); Chanfro de diversas arestas com a estratégia *Contour (2d Chanfer)* (c e d).

Como podemos constatar pela figura 4.21 – a, foram realizados 3 furos passantes com uma broca helicoidal de 5 mm com a estratégia *Peck Drill*. Posteriormente foi realizada a roscagem com um macho M6 direito (figura 4.21 - b) através da estratégia *TAP RH*.



(a)



(b)

Figura 4.22 – Definição no MASTERCAM® da ferramenta utilizada (a); Macho de roscar M6 direito utilizado (b).

Finalmente, observando a figura 4.21 (c e d) podemos constatar que a peça foi concluída com duas operações de *Contour (2d Chanfer)*.

No trabalho do Exemplo 1 - Trabalho 2D, o número de ciclos de maquinagem é considerável. Foram definidos doze ciclos para o 1º aperto e sete ciclos para o 2º aperto, conforme apresentado na figura 4.23.

Na figura 4.24 são apresentadas algumas imagens representativas da execução dos ciclos de maquinagem do 2º aperto.

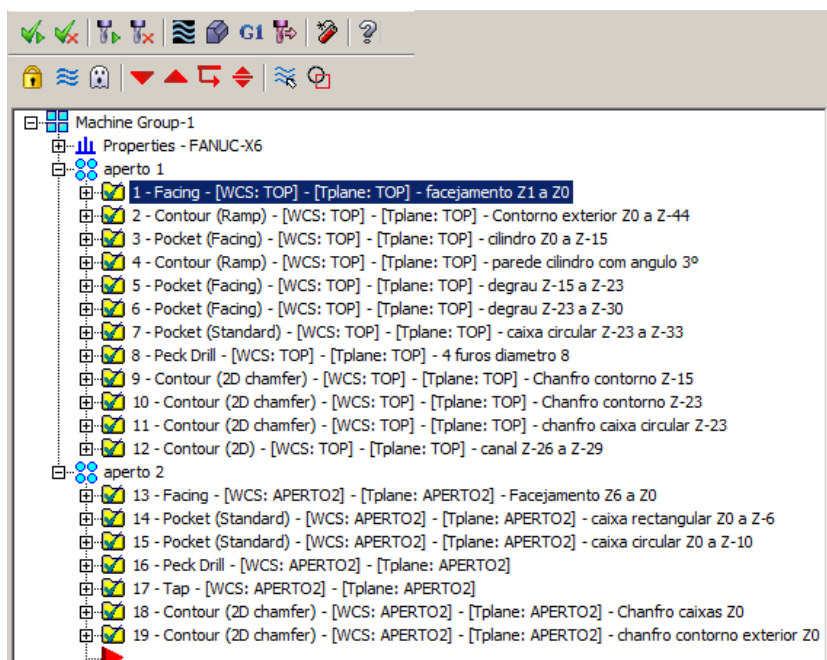


Figura 4.23 – Lista dos Ciclos de Maquinagem criados para executar o Exemplo 1 - Trabalho 2D



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.24 – Diferentes etapas de maquinagem relativas ao 2º Aperto

Na tabela 4.3 indica-se o tempo estimado no *software* MASTERCAM® para a execução de cada ciclo definido, sendo o tempo total de 31 minutos e 21 segundos. É de notar que o tempo real de maquinagem foi ligeiramente maior (2 ou 3 minutos) devido ao cálculo do tempo estimado

de maquinagem não entrar em linha de conta com o tempo de troca da ferramenta e as acelerações e desacelerações que a ferramenta executa. Além disso, o deslocamento da ferramenta em velocidade rápida praticado no centro de maquinagem não foi exatamente aquele que serviu de cálculo para a estimativa apresentada na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Tempos de Maquinagem dos Ciclos utilizados calculados no MASTERCAM®

Ciclo	Estratégia	Ferramenta Utilizada	Tempo de Maquinagem
1	<i>Facing</i>	1	1 min 5 seg
2	<i>Contour (Ramp)</i>	2	6 min 59 seg
3	<i>Pocket (Facing)</i>	2	4 min 38 seg
4	<i>Contour (Ramp)</i>	7	16 seg
5	<i>Pocket (Facing)</i>	2	3 min 6 seg
6	<i>Pocket (Facing)</i>	2	2 min 17 seg
7	<i>Pocket (Standard)</i>	2	16 seg
8	<i>Peck Drill</i>	3	28 seg
9	<i>Contour (2D Chanfer)</i>	6	11 seg
10	<i>Contour (2D Chanfer)</i>	6	19 seg
11	<i>Contour (2D Chanfer)</i>	6	5 seg
12	<i>Contour (2D)</i>	6	6 min 24 seg
13	<i>Facing</i>	6	1 min 18 seg
14	<i>Pocket (Standard)</i>	8	58 seg
15	<i>Pocket (Standard)</i>	2	38 seg
16	<i>Peck Drill</i>	4	20 seg
17	<i>Tap</i>	5	1 min 22 seg
18	<i>Contour (2D Chanfer)</i>	6	16 seg
19	<i>Contour (2D Chanfer)</i>	6	19 seg
Total			31 min 21 seg

Na figura 4.25 é possível constatar-se o excelente acabamento superficial da peça depois de envernizada:



(a)



(b)

Figura 4.25 – Aspeto da peça envernizada

4.2.3. ENGENHARIA INVERSA

Após obter o componente, recorreu-se a um Scanner laser tridimensional (3D), para executar o processo de Engenharia Inversa do Exemplo 1 - Trabalho 2D, ou seja, construir um modelo em formato digital que representasse as características do modelo físico, a partir da nuvem de pontos adquirida.

O equipamento referido no parágrafo anterior foi o 3D Laser Scanner LPX-600, desenvolvido pela empresa Roland DG Corporation, conforme se ilustra na figura 4.26 e cujas especificações técnicas principais são apresentadas na tabela 4.4.



Figura 4.26 – 3D Laser Scanner LPX-600

Este Scanner baseia-se na técnica de triangulação por feixe de laser já explicitada anteriormente.

Tabela 4.4 – Especificações técnicas do equipamento utilizado

Especificações Técnicas	
Área de trabalho	254 mm (diâmetro) / 406,5 mm (altura)
Peso máximo na mesa	5 Kg
Resolução máxima	0,2 mm
Número máximo de planos	6
Velocidade	9 rpm (rotação do prato)
Passo de varrimento	50 mm/s
Formatos de exportação	DXF, VRML, STL, IGES
Método de digitalização	Laser Óptico - Triangulação “Spot-Beam”
Peso do equipamento	63 kg

4.2.3.1. AQUISIÇÃO DE DADOS POR DIGITALIZAÇÃO

Começou-se por se proceder à limpeza da peça em estudo, para remoção de eventuais substâncias gordurosas, usando-se para o efeito um produto desengordurante. Como já foi referido anteriormente, durante a aquisição da nuvem de pontos dever-se-á evitar que reflita ou

deixe passar a luz emitida pelo laser, para que desta forma o Scanner consiga fazer a aquisição de dados e assim constituir a nuvem de pontos.

É então necessário pulverizar a peça com um pó revelador, de modo a atenuar a possibilidade de reflexão do feixe laser. O pó utilizado foi da marca CGM® – Rotrivel U, sendo muito importante pulverizar a peça de uma forma uniforme e muito cuidada, para que desta forma não se formem sobreespessuras não uniformes na superfície, o que iria originar resultados errados durante a leitura.

Após estar garantido o tratamento superficial da peça, a mesma foi colocada no interior da câmara do Scanner, sobre o “prato giratório”, utilizando uma base de apoio (figura 4.27 – a), para desta forma se conseguir orientar a peça e assim evitar a existência de “ângulos mortos” relativamente ao feixe laser. Mais tarde realizou-se uma segunda aquisição de dados (figura 4.27 – b), com a peça apoiada na sua base, com o objetivo de se obter uma melhor definição da parte lateral da peça. A mesma deve sempre que possível ser colocada ao centro do prato e não exceder o diâmetro do mesmo.

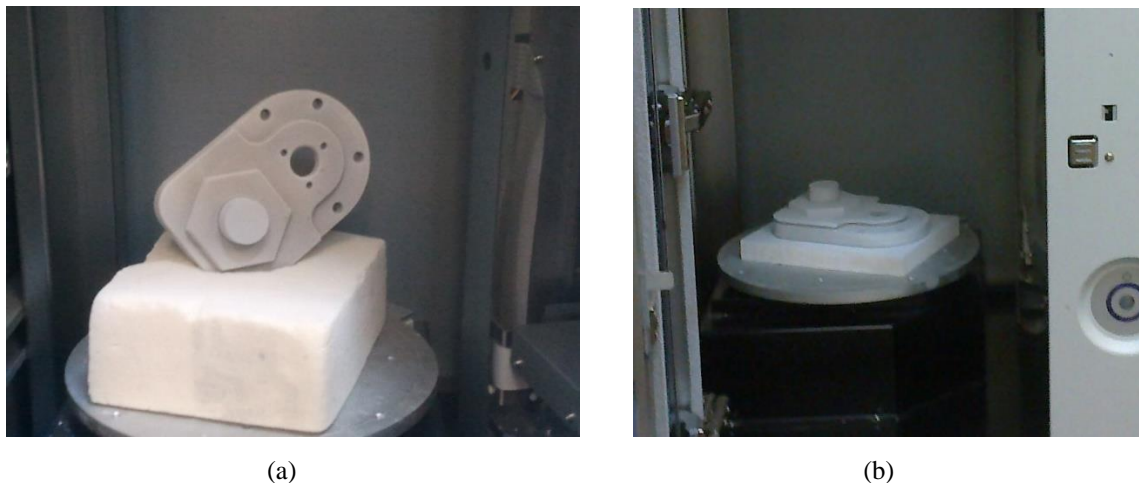


Figura 4.27 – Peça colocada no centro do prato do Scanner: 1ª Digitalização (a); 2ª Digitalização (b).

O *software* utilizado na aquisição da nuvem de pontos foi o Dr. Picza3®. No comando *scan*, surgem dois tipos de digitalização, rotacional ou planar. Conforme a geometria da peça que se pretende digitalizar assim se opta por realizar uma aquisição rotacional ou planar. Peças com curvas suaves e reduzido desnível, ou seja, com forma semelhante a uma esfera ou um cilindro, a digitalização deverá ser feita em modo rotacional.

Nas peças com outras formas, dever-se-á optar pela aquisição planar, optando-se normalmente por este modo pois tem menores restrições quanto à forma. No presente trabalho utilizou-se uma aquisição planar.

Antes de se proceder à aquisição definitiva da nuvem de pontos, dever-se-á realizar uma aquisição de previsualização para ajustar os parâmetros finais de digitalização. Os principais parâmetros a definir são a área de varrimento do *scanner*, quer seja em largura, quer seja em altura, dever-se-á também definir o passo vertical e horizontal e por último, no caso da aquisição

planar, o número de planos a varrer (máximo de 6). Neste caso utilizaram-se para o passo vertical e horizontal um valor de 0,2 mm e optou-se por 6 planos de varrimento.

Os dados obtidos na aquisição da geometria da peça podem ser exportados em formatos diferentes (ex.: STL, DXF, TXT, etc.), conforme o *software* a utilizar no tratamento da nuvem de pontos adquirida, sendo neste caso exportados no formato TXT.

4.2.3.2. TRATAMENTO DA NUVEM DE PONTOS E MALHA POLIGONAL

A exportação da nuvem de pontos no formato TXT possibilitou o uso do *software* GEOMAGIC STUDIO® 2014 – TRIAL, cedido pela Geomagic Foundation após solicitação, para assim poderem ser utilizados os assumidos recursos, nomeadamente no que diz respeito à inspeção, e tratamento do mesmo.

Apresentam-se em seguida os resultados das nuvens de pontos adquiridas, já em ambiente Geomagic, sem qualquer manipulação:

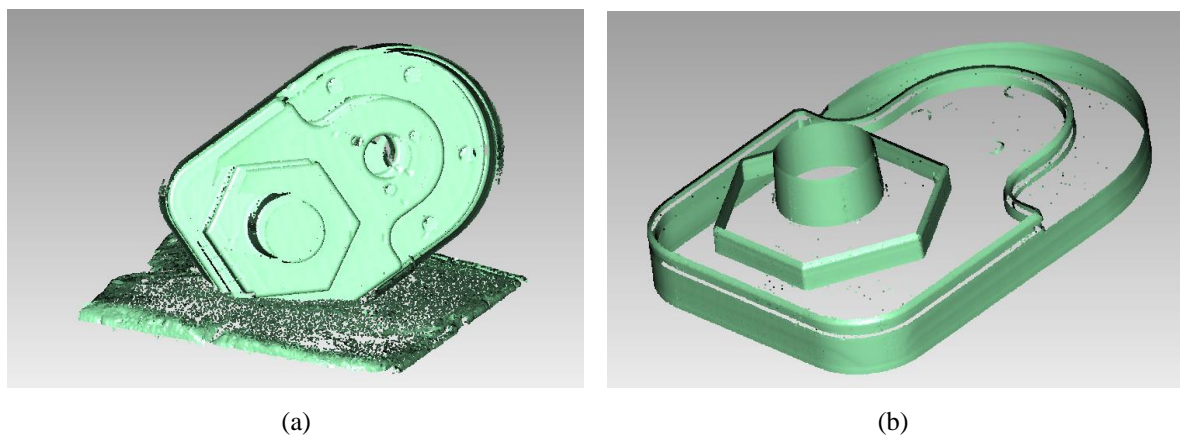


Figura 4.28 – Nuvens de Pontos em ambiente Geomagic: 1ª Digitalização (a); 2ª Digitalização (b).

Inicialmente eliminou-se o chamado ruído destas nuvens de pontos manualmente. Em seguida foi utilizado o comando reduzir ruído para este ser eliminado automaticamente e filtrar por distância, eliminando assim o ruído através de um valor de distância fornecida. Procedeu-se a diversas operações de alinhamento manual e global, especialmente na primeira digitalização constituída por 6 planos, ou seja, foi necessário alinhar todos estes planos entre si, porque como podemos depreender pela figura 4.28 - a, os planos entre si encontravam-se algo desalinhados. Mais tarde procedeu-se ao alinhamento dos resultados finais entre si e ainda à utilização dos comandos uniforme, para colocar os pontos de uma forma mais homogénea.

A partir da nuvem de pontos apresentada na figura 4.29 - a e b, utilizando o comando Wrap, gerou-se a malha poligonal observada na figura 4.29 - c e d, cujo detalhe da malha poligonal é possível analisar na figura 4.30.

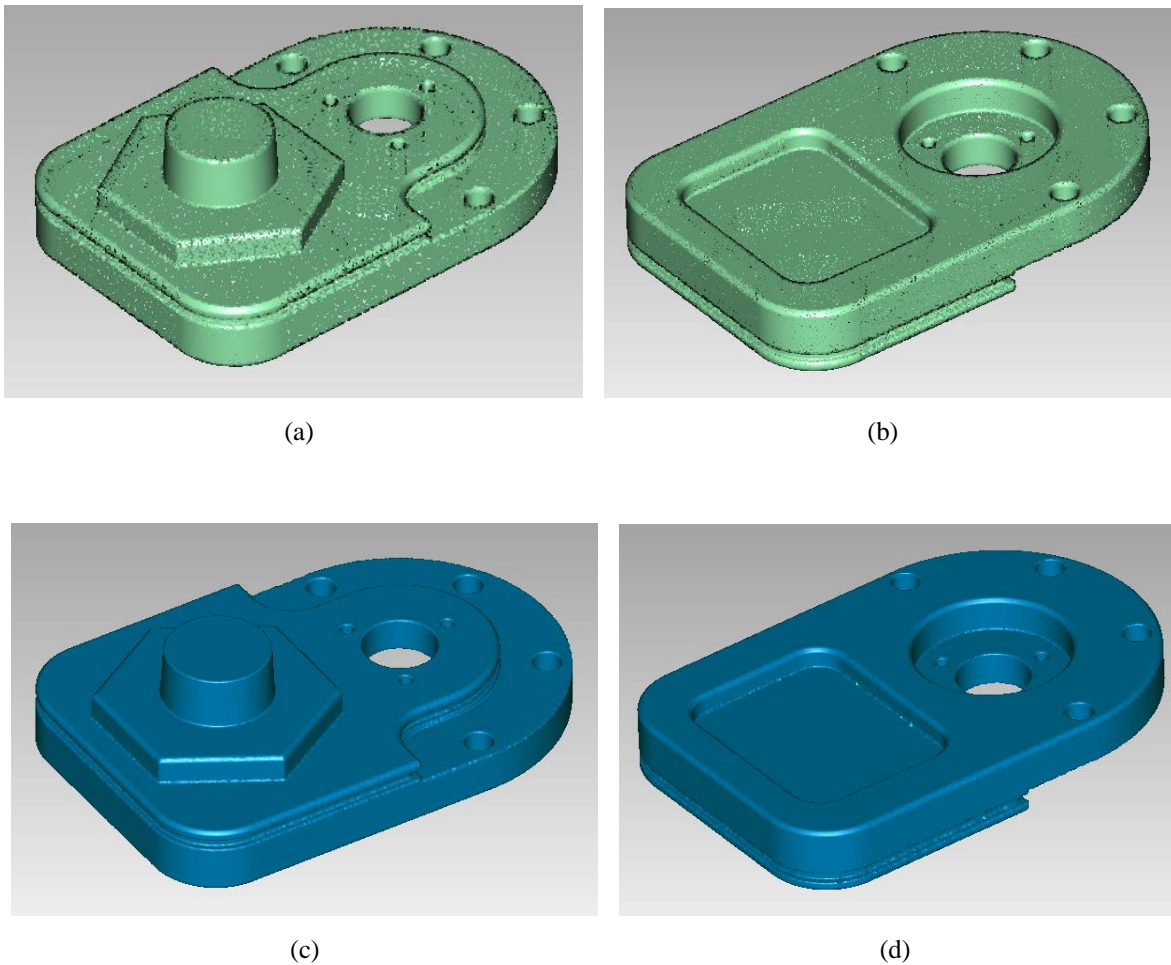


Figura 4.29 – Resultados da nuvem de pontos e malha poligonal: Aspetto da nuvem de pontos (a e b); Aspetto da superfície gerada a partir da nuvem de pontos (c e d)

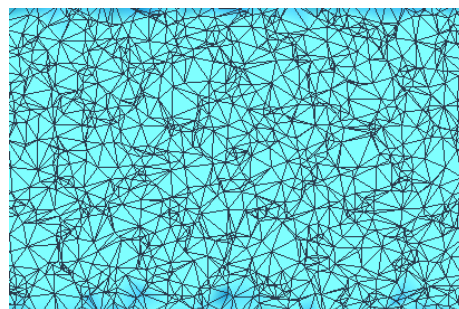


Figura 4.30 – Aspetto da malha poligonal

Iniciou-se o tratamento da malha poligonal que como é possível visualizar pela figura 4.30, encontra-se bastante irregular. Assim, foi necessário reconstruir parte da mesma, através dos comandos Doutor de Malha que foi utilizado reparando automaticamente imperfeições da malha do polígono, refazer malha, voltando este a triangular uma malha de polígono para produzir um mosaico mais uniforme.

Foi necessário apagar várias partes da malha poligonal e reconstruí-la através do comando Preencher Único. Foram também utilizados comandos de relaxamento, remoção de picos e suavização rápida, permitindo assim suavizar a malha de polígono e tornar os triângulos mais

uniformes. Durante este trabalho foi necessário voltar a converter a malha poligonal em pontos e repetir novamente o processo referido no presente parágrafo.

Ilustram-se nas figuras seguintes duas diferentes vistas da peça após tratamento dos dados, onde são evidentes as melhorias conseguidas, no que diz respeito ao aspeto superficial da mesma.

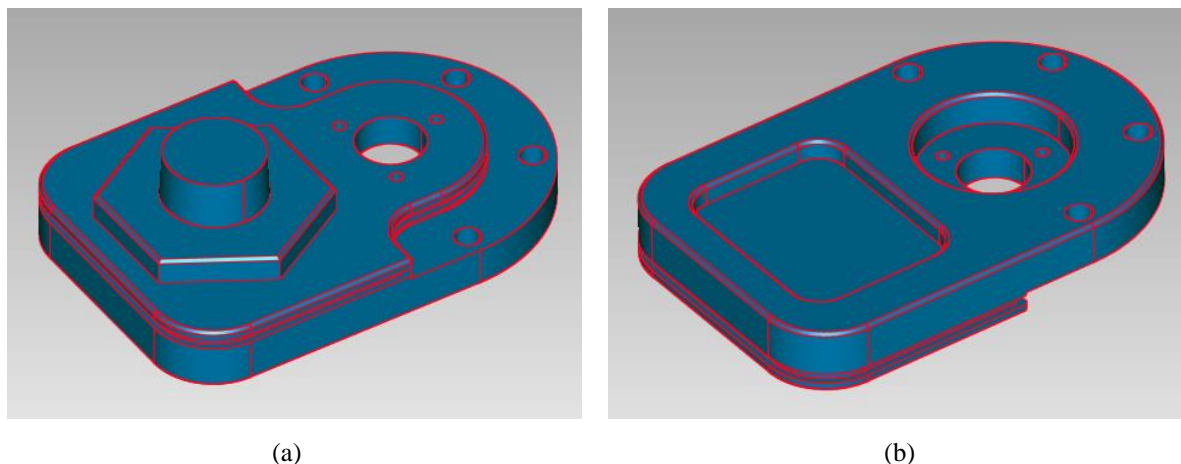


Figura 4.31 – Aspeto superficial da peça

No que diz respeito à malha poligonal, verificam-se igualmente grandes melhorias, já que a mesma apresenta agora uma configuração uniforme por toda a peça, conforme é apresentado nas figuras seguintes (figuras 4.31 e 4.32):

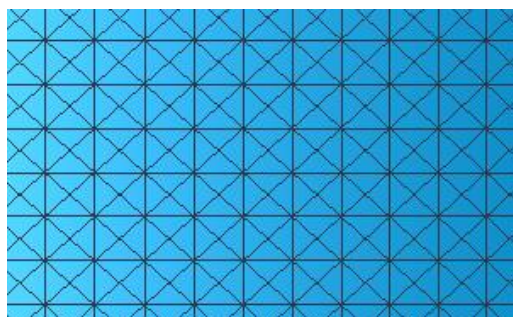


Figura 4.32 – Aspeto da malha poligonal

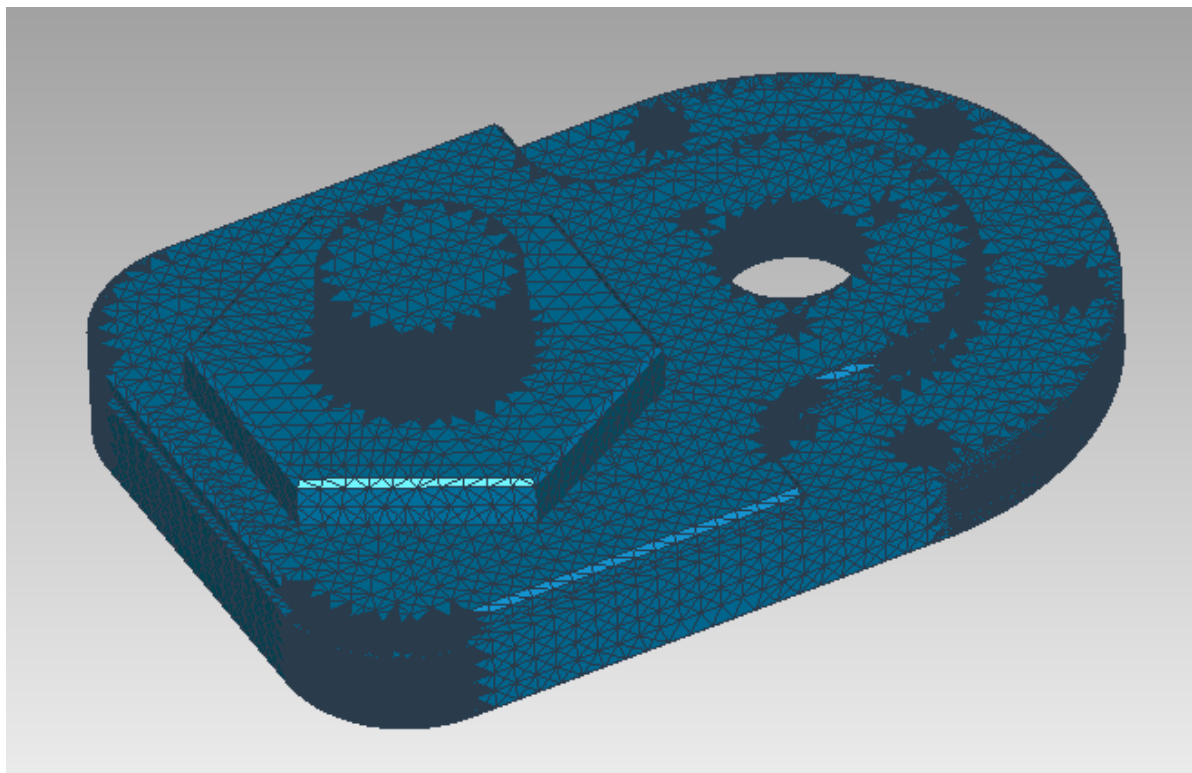


Figura 4.33 – Vista em Perspetiva da malha poligonal da peça após tratamento.

4.3. EXEMPLO 2 - TRABALHO 3D

4.3.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

De modo a aplicar os ciclos de maquinaria do MASTERCAM[®] vocacionados para geometrias CAD desenhadas a 3D, foi decidido elaborar o trabalho que em seguida se descreve, tendo sido o fabrico deste componente efetuado a partir de um bloco de uma liga de alumínio.

Este trabalho consiste no fabrico de um molde para uma saboneteira. Para obter a geometria do molde, foi desenhado o modelo 3D da saboneteira pretendida, obtendo-se a cavidade do molde recorrendo ao *software* SOLID-WORKS[®]. Realizou-se a extração da cavidade com o aplicativo MOLD-TOOLS do SOLID-WORKS[®], depois de extraída a cavidade, esta foi importada para o *software* MASTERCAM[®] e inserido o texto “MADE IN PORTUGAL” juntamente com um mapa de Portugal.

4.3.2. GEOMETRIA A MAQUINAR

A geometria desenhada encontra-se representada na figura 4.34, tendo-se tido o cuidado de criar um modelo que respeita as principais regras para uma peça a ser obtida por moldação com resina termoendurecível, isto é, paredes com ângulo de saídas que facilitem a extração (4° de inclinação), inexistência de ângulos que prendam a peça durante a extração (contra-saídas) e ainda a existência de raios de concordância entre arestas de valor relativamente elevado (menor valor do raio adotado foi 4 mm - a representação desta peça e respetiva cotagem detalhada é apresentada em anexo em Desenho n° 2).

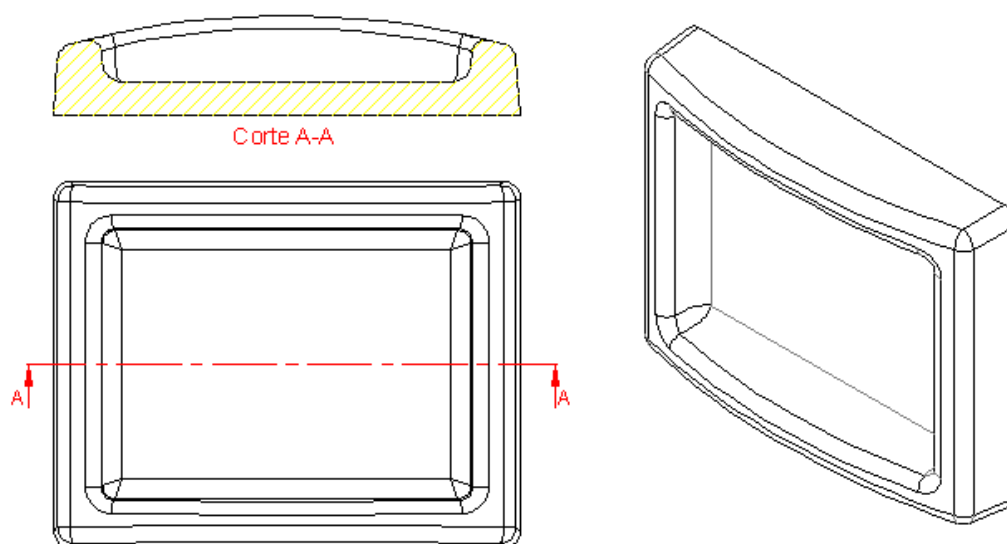


Figura 4.34 – Perspetiva, vista superior e corte da saboneteira.

Após uma análise detalhada da cotação e dos ângulos das cavidades (ver Desenho nº 2) constatou-se que estaríamos agora em condições de realizar o molde. Para o efeito seria necessário a extração da bucha e da cavidade, pelo que foi necessário como já referido anteriormente, a utilização de um aplicativo denominado MOLD-TOOLS.

Conforme se ilustra nas Figuras seguintes, foi realizada a extração da bucha e cavidade utilizando um conjunto de operações que se descrevem resumidamente. Com o comando *Parting Line*, foi defininda a linha de partição Bucha/Cavidade (linha a azul na figura 4.35 – b), sendo ainda possível visualizar nesta figura uma “película” que define um plano e que passa na linha de partição, sendo esta realizada com o comando *Parting Surfaces*. Na figura 4.35 – c, observa-se o resultado da utilização do comando *Tooling Split*, criando assim a cavidade e a bucha inserida nas respectivas placas do molde. Foi utilizado o comando *Move/Copy* (figura 4.35 – d, e, e f) para afastar a cavidade e a bucha e finalmente através do *Insert Into New Part* para colocar a cavidade que, neste caso é o que tem utilidade, num ficheiro separado, já que a bucha não é necessária no caso deste molde para a obtenção de uma peça por vazamento por gravidade de uma resina termoendurecível.

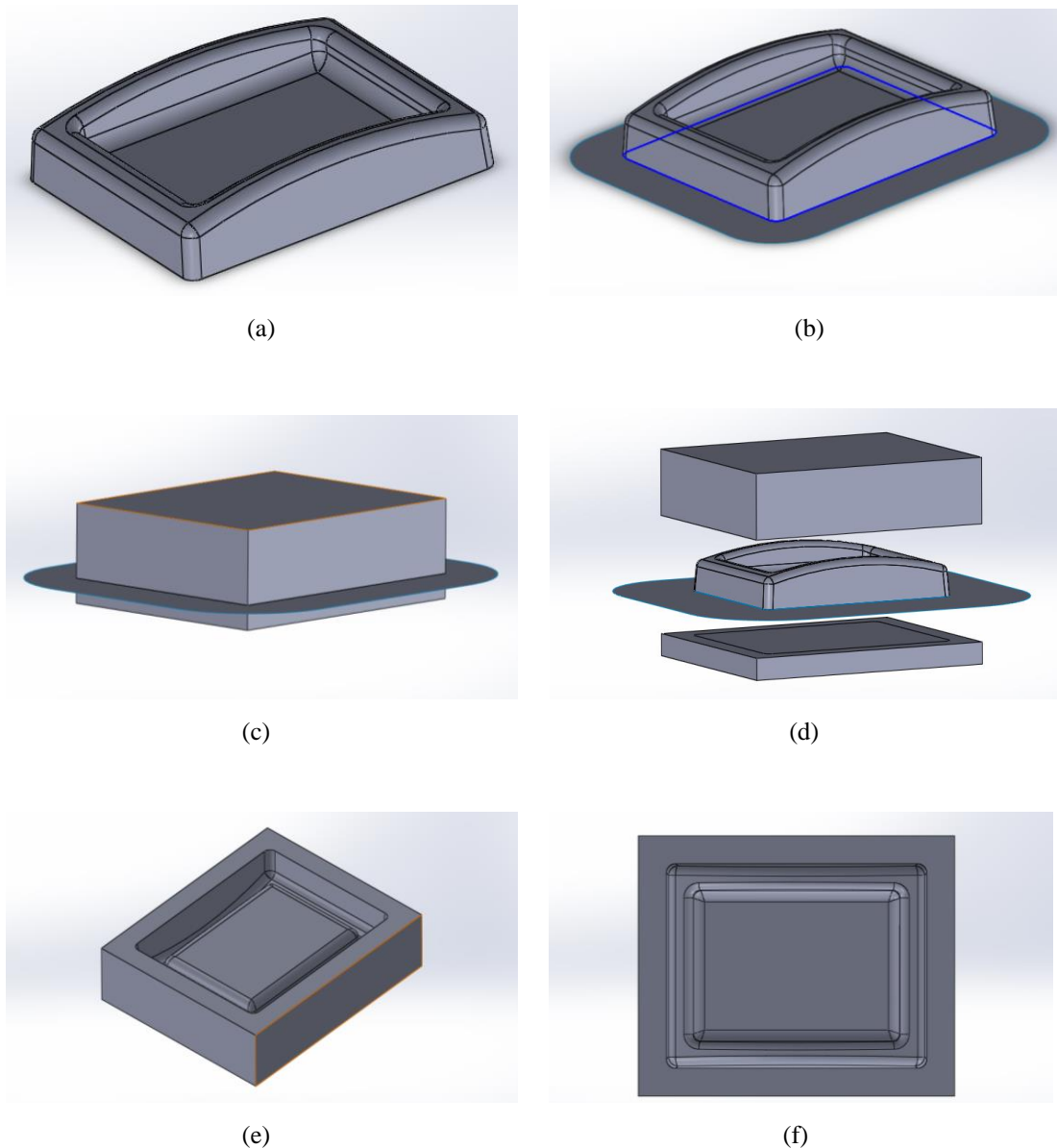


Figura 4.35 – Extração da Cavidade através do aplicativo Mold Tools do SOLID-WORKS®: Perspectiva da saboneteira (a); Utilização do comando *Parting Surfaces* (b) Utilização do comando *Tooling Split* (c); Aplicação do comando *Move/Copy*, afastando a cavidade para a parte superior da saboneira e a bucha para a inferior (d); Vista em perspectiva e superior da cavidade do molde obtida (e e f).

4.3.3. PROGRAMAÇÃO DOS CICLOS DE MAQUINAGEM E RESULTADO OBTIDO

Tal como no Exemplo 1 - Trabalho 2D, também aqui foi necessário realizar a importação da geometria CAD, sendo neste caso um sólido do SOLID-WORKS® para o MASTERCAM®.

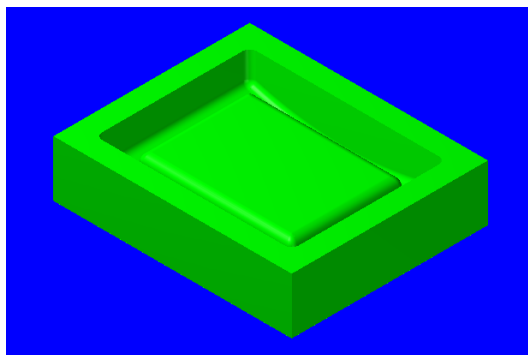
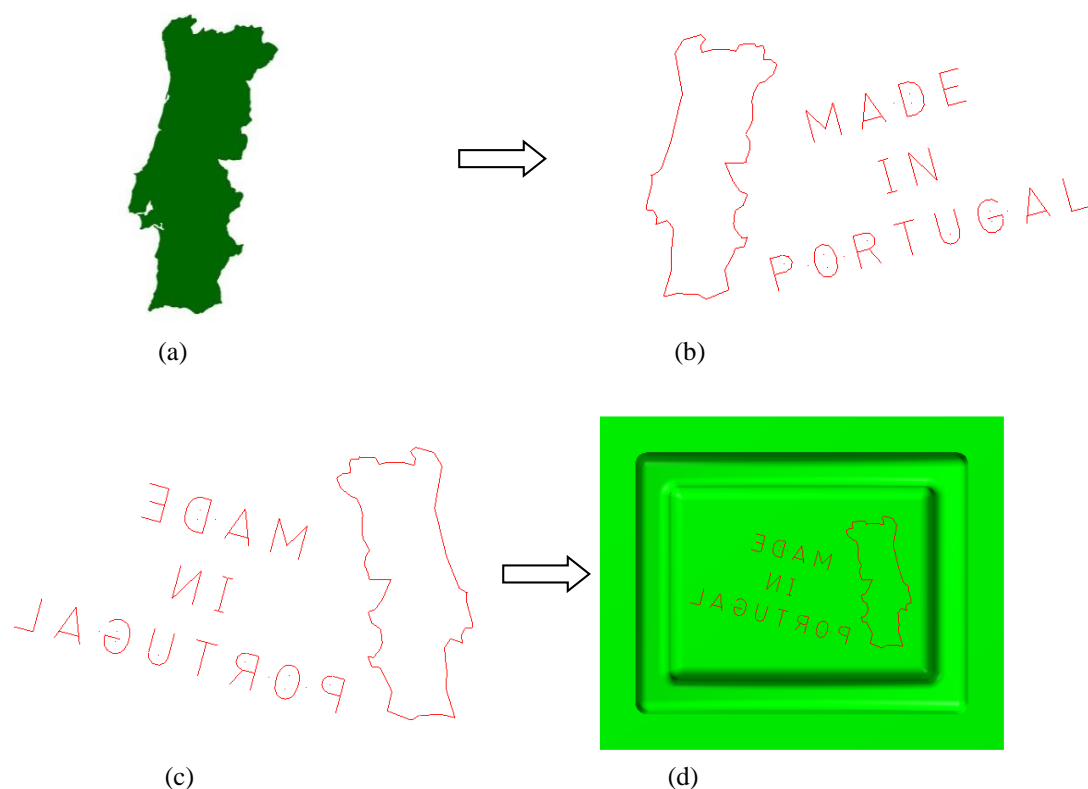
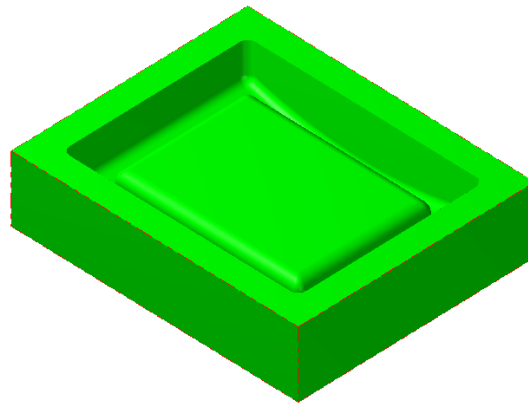


Figura 4.36 – Geometria 3D do molde importada para o MASTERCAM®

Com a aplicação Rast2vec do *software* MASTERCAM® foi criado a partir de uma imagem JPEG do mapa de Portugal (figura 4.37 – a) um conjunto de vetores deste mesmo mapa, sendo ainda inserido o texto “MADE IN PORTUGAL” com o comando *Create - Letters* (figura 4.37 – b), utilizando-se por fim o comando *Mirror*, de modo a obter o negativo da figura e do texto a inserir na cavidade do molde (figura 4.37 – c e d).

Figura 4.37 – Criação do Mapa de Portugal e Texto no *software* MASTERCAM®

Antes de criar os ciclos de maquinagem, em primeiro lugar foi definida a dimensão do *Bounding box*, ou seja, a implementação das dimensões segundo X, Y e Z do bloco a considerar para a simulação das trajetórias da ferramenta. Este *Stock* retangular foi criado com as dimensões de 170*140*40 mm, sendo representado por uma linha a traço interrompido vermelha sobre as arestas exteriores da figura 3D (figura 4.38).

Figura 4.38 – Criação do *Stock Setup*

O zero peça foi definido de modo a coincidir com o canto da parte superior do *Stock*, tal como é possível constatar-se na figura 4.39:

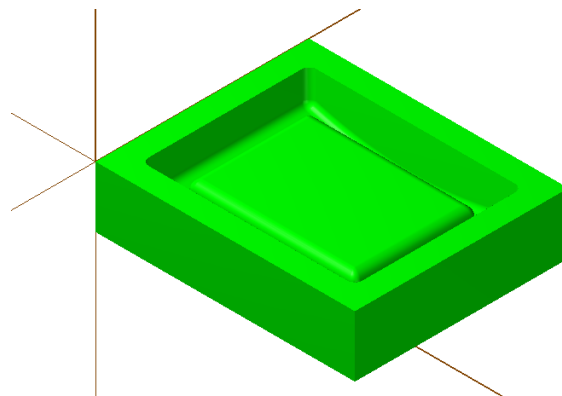


Figura 4.39 – Definição do zero peça

Os Ciclos *Surface High Speed* do MASTERCAM® para 3 eixos disponíveis para utilizar em modelos 3D para definir trajetórias, são os que se encontram listados na tabela 4.5. Inicialmente é necessário escolher-se o tipo de trajetórias que se pretende: desbaste (*Roughing*) ou acabamento (*Finishing*), para depois se selecionar o método de corte.

Tabela 4.5 – Ciclos *Surface High Speed* do MASTERCAM® para 3 eixos

<i>Roughing</i> (Desbaste)	<i>Finishing</i> (Acabamento)
Core Rough	Waterline
Área Clearance	Scallop
Rest Rough	Horizontal Área
OptiCore	Raster
OptiArea	Pencil
OptiRest	Spiral
	Radial
	Hybrid

Na figura 4.40 e tabela 4.6 apresentam-se as ferramentas utilizadas neste trabalho.



Figura 4.40 – Ferramentas utilizadas na maquinagem do trabalho 3D

Tabela 4.6 – Ferramentas Utilizadas

Número da Ferramenta utilizada	Descrição
1	Fresa de ripa (Desbaste) de topo plano com 10 mm de diâmetro, e 3 gumes de corte
2	Fresa de topo plano com 10 mm de diâmetro e 4 gumes de corte (Acabamento)
3	Fresa de topo esférico com 6 mm de diâmetro e 2 gumes de corte
4	Fresa de topo esférico com 2 mm de diâmetro e 2 gumes de corte

Tabela 4.7 - Parâmetros de corte para maquinagem do trabalho 2D

Número da Ferramenta utilizada	N.º de Gumes de Corte	Velocidade de Corte [m/min]	Avanço por dente [mm/dente]	Velocidade de rotação [RPM]	Velocidade de corte XY [mm/min]	Velocidade de corte Z [mm/min]
1	3	120	0,08	3819,7	916,7	458,4
2	4	120	0,08	3819,7	1222,3	611,2
3	2	120	0,047	5900*	554,6	277,3
4	2	120	0,02	5900*	236	118

* Valores usados devido à limitação da fresadora (5900 RPM)

Para maquinar este molde começou-se por realizar o desbaste, recorrendo à estratégia *Area Clearance*, sendo esta uma estratégia vocacionada para maquinar cavidades e caixas que preferencialmente devam ser maquinadas do interior para o exterior. Foi utilizada para o efeito uma fresa de topo plano 3 gumes de 10 mm de ripa (figura 4.40 – ferramenta 1). Sendo esta uma operação de desbaste, optou-se por deixar 0.5 mm de sobreespessura de material para acabamento posterior.

Na figura 4.41 - a e b, apresentam-se as trajetórias para o Ciclo *Área Clearance*, bem como a simulação tridimensional da maquinagem.

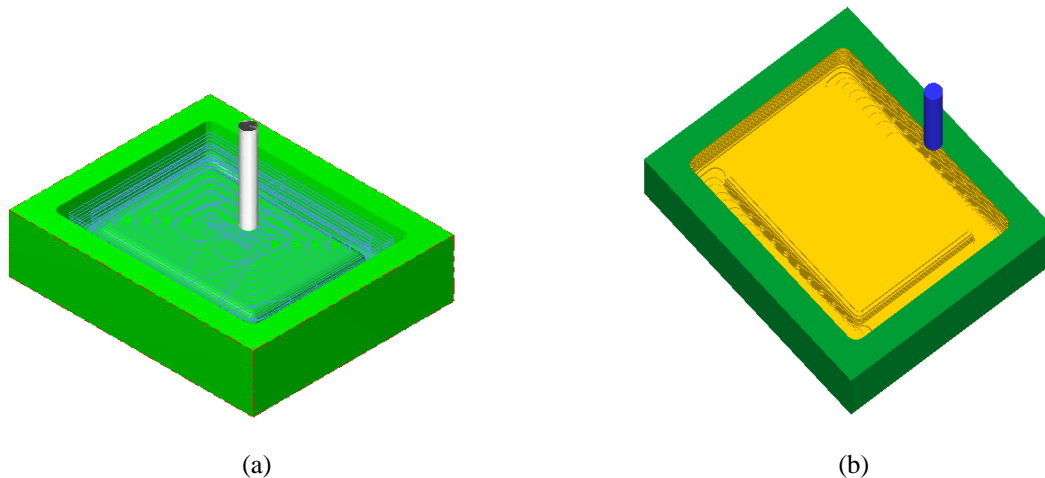


Figura 4.41 – Simulação das trajetórias de maquinagem relativas ao 1º Ciclo : Trajetória da ferramenta com a estratégia *Área Clearance* (a); Resultado depois de executar a estratégia *Área Clearance* (b).

O 2º Ciclo de maquinagem foi realizado com a estratégia *Horizontal Área*, sendo esta vocacionada para áreas planas ou com pequenos declives. O movimento de corte foi efetuado do centro para o exterior, com uma cota Z constante. Também nesta estratégia se optou por deixar 0.5 mm de sobreespessura de material, sendo utilizada a mesma fresa da operação anterior (figura 4.42).

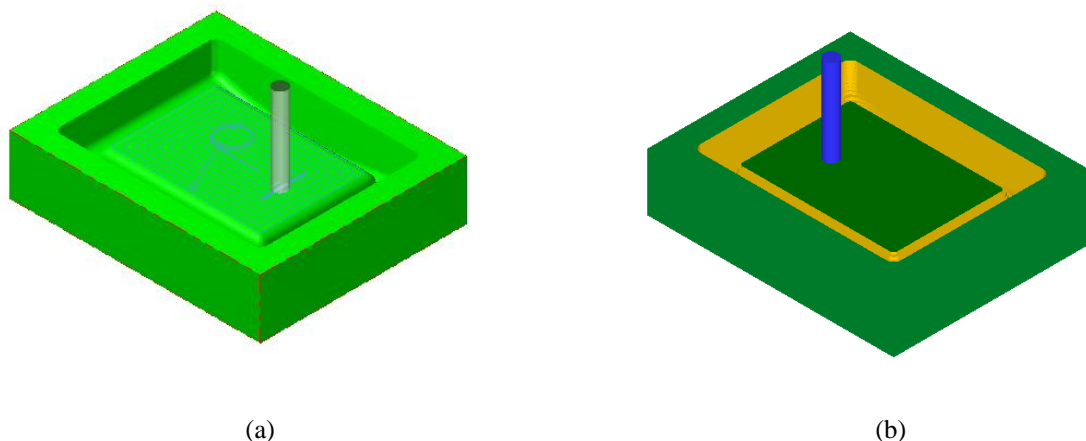


Figura 4.42 – Simulação das trajetórias de maquinagem relativas ao 2º Ciclo: Trajetória da ferramenta com a estratégia *Horizontal Área* (a); Resultado depois de executar a estratégia *Horizontal Área* (b).

Passando ao 3º Ciclo, foi decidido utilizar o Ciclo Hybrid que habitualmente se utiliza em operações de acabamento quando da existência conjunta de superfícies planas e curvas. Neste caso, dado ser uma operação de acabamento, não se deixou qualquer sobreespessura. Utilizaram-se duas fronteiras, para que neste ciclo o movimento da ferramenta ficasse circunscrito à região pretendida. Para a realização da maquinagem do presente ciclo utilizou-se uma fresa de topo esférico de 2 gumes de 6 mm de diâmetro (figura 4.43). Note-se que neste ciclo recorreu-se à tabela 1.7 – Valores da Altura da Crista (*Scallop height*) em milímetros, apresentada no Capítulo 1, tendo sido escolhido um valor de 0,0009 mm para o *scallop height* para obter um acabamento de boa qualidade.

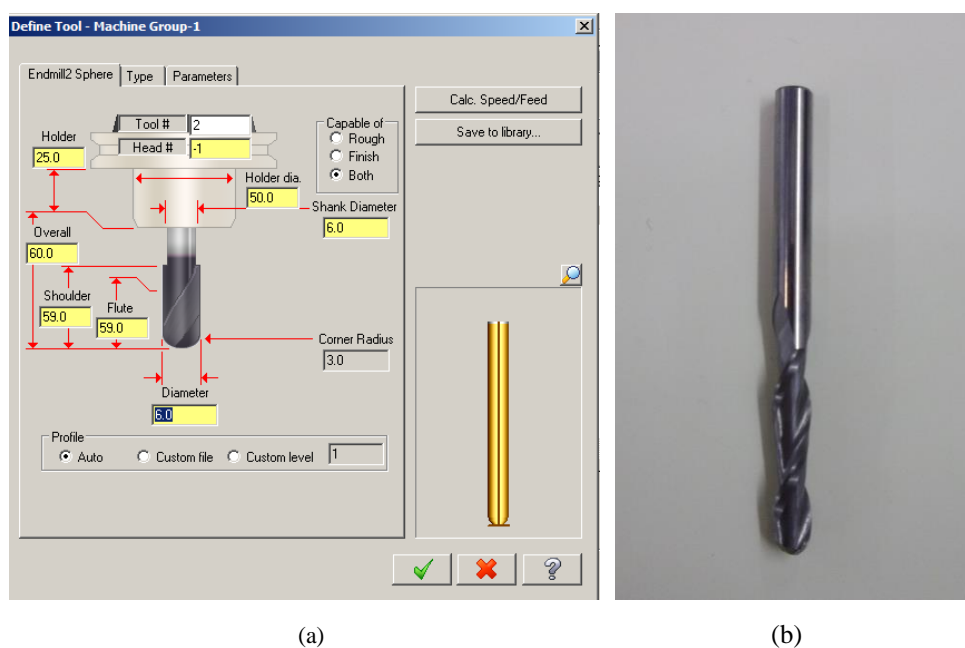


Figura 4.43 – Definição no MASTERCAM® da fresa de topo esférico: Definição no MASTERCAM® (a); Fresa de topo esférico utilizada (b).

Após o Ciclo (*Hybrid*), realizou-se o 4º Ciclo novamente através da estratégia *Horizontal Area* para desta forma se realizar o acabamento da superfície horizontal. Tal como é facilmente perceptível na figura 4.44 - b, foi necessário utilizar uma fronteira para que a maquinagem apenas se realizasse na zona desejada. Neste ciclo utilizou-se uma fresa de topo plano de 4 gumes e 10 mm de diâmetro (figura 4.40 – ferramenta 2).

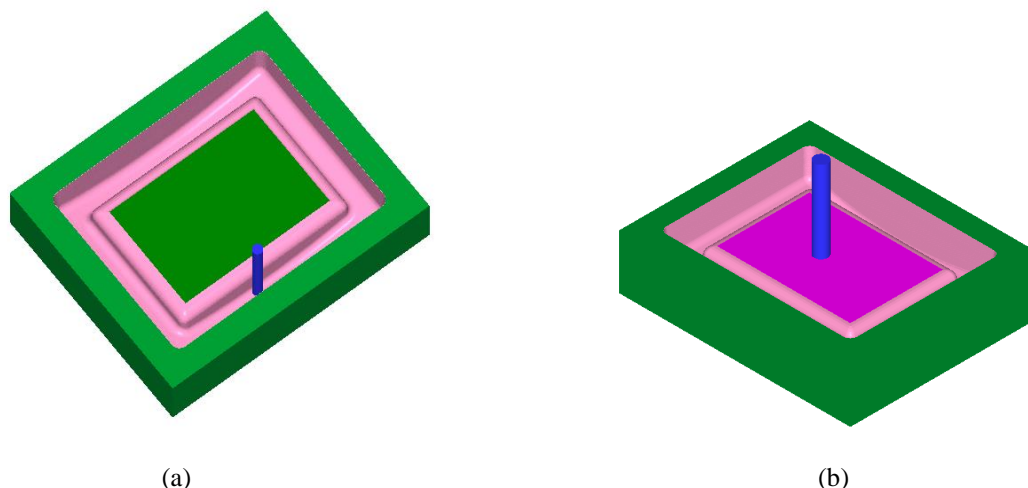


Figura 4.44 – Simulação das trajetórias de maquinagem relativas ao 3º e 4º Ciclo: Simulação com a estratégia *Hybrid* (a); Resultado depois de executar a estratégia *Horizontal Area* (b).

Considerando que todos os ciclos foram definidos com uma tolerância máxima de erro de 0,02 mm, para gerar as trajetórias de movimento da ferramenta, para verificação da tolerância dimensional imposta nos ciclos de acabamento do MASTERCAM® foi utilizada a opção *STL COMPARE*, sendo esta uma aplicação do *software*. Assim, a comparação dimensional entre a simulação da maquinagem com a geometria inicial do modelo CAD (ficheiro estereolitográfico – STL), é apresentada na figura 4.45.

Como é possível constatar-se pelas imagens que se ilustram na figura seguinte, as trajetórias geradas para as ferramentas utilizadas permitem afirmar que o erro dimensional nesta fase é inferior a 0,02 mm. Relativamente às entidades que definem a geometria. Durante a maquinagem, diversos desvios dimensionais poderão ocorrer, sendo analisados mais à frente neste trabalho.

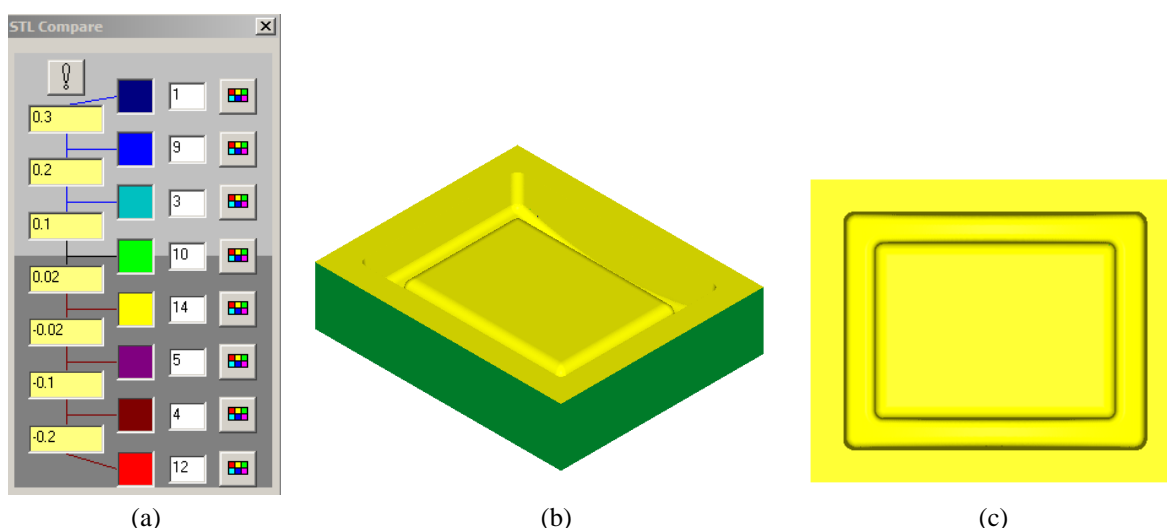


Figura 4.45 – Realização do *STL COMPARE*: Menu com definição dos intervalos dimensionais e com graduação de cores (a); Resultado observado no molde em perspectiva (b) Resultado observado na vista superior do molde (c).

Para concluir os ciclos de maquinagem deste trabalho, no 5º e último Ciclo realizou-se a gravação do texto e mapa (figura 4.46), recorrendo para o efeito à estratégia *Contour (2D)*. Utilizou-se uma fresa de topo esférico de 2 gumes e de 2 mm de diâmetro (figura 4.40 – ferramenta 4).

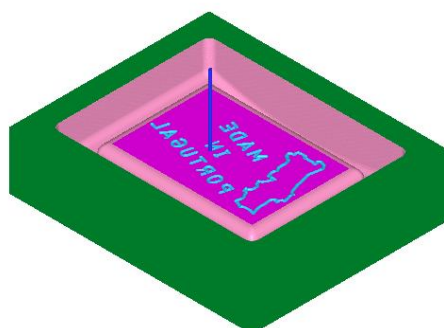


Figura 4.46 – Simulação do 5º Ciclo de Maquinagem com a estratégia *Contour 2D*

Na tabela 4.8 são apresentados os valores dos tempos de maquinagem para os ciclos utilizados. Tal como seria de esperar, o ciclo *Hybrid* é o mais longo, devido à utilização de uma ferramenta de topo esférico a executar movimentos consecutivos muito próximos, de modo a reproduzir as superfícies com elementos curvos. Um tempo de maquinagem total foi de 4 h 15 min. Recordando que o trabalho 2d foi realizado num tempo total de 31 min. 21 seg., apesar da relativa complexidade da peça e do maior número de ciclos utilizados, é possível concluir que apenas devem ser utilizadas operações 3D se necessário, já que o tempo de maquinagem é na maioria dos casos significativamente superior para estas últimas. Por este motivo, os ciclos para operações 2D devem ser os preferidos, desde que a sua utilização seja viável para reproduzir o modelo CAD.

O tempo de maquinagem dos componentes dos exemplos 1 e 2 estão refletidos, no número de linhas de código CNC destes trabalhos. Enquanto que o primeiro trabalho, após pós-processamento, apresentava 4253 linhas, o segundo apresenta 38194 linhas de código CNC.

Tabela 4.8 – Tempos de Maquinagem dos Ciclos Utilizados

Ciclo	Estratégia	Ferramenta Utilizada	Tempo de Maquinagem
1	<i>Area Clearance</i>	1	22 min
2	<i>Horizontal Area</i>	2	2 min
3	<i>Hybrid</i>	3	3 h 35 min
4	<i>Horizontal Area</i>	4	3 min
5	<i>Contour 2D</i>	5	13 min
		Total	4 h 15 min

Nas Figuras seguinte são apresentadas diversas imagens obtidas durante o fabrico.



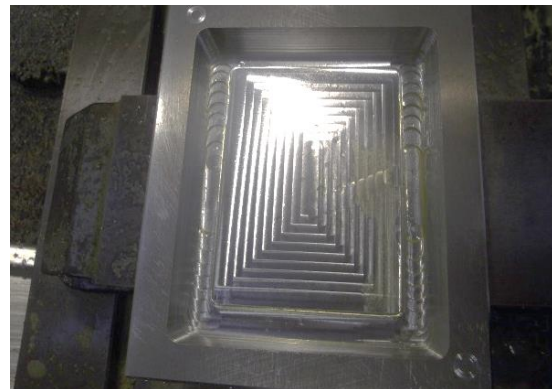
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 4.47 – Diferentes etapas de maquinação do Trabalho 3D

Apresentam-se na figura seguinte imagens do molde depois de realizado o polimento.



(a)



(b)

Figura 4.48 – Aspeto da superfície do molde depois de realizado o polimento.

4.3.4. ENGENHARIA INVERSA

Utilizando-se para o efeito o Scanner tridimensional já referido anteriormente, foi realizada a aquisição da nuvem de pontos do molde produzido, para posterior comparação dimensional entre o modelo CAD inicial e o componente fabricado e digitalizado.

4.3.4.1. AQUISIÇÃO DE DADOS POR DIGITALIZAÇÃO

Como já foi referido anteriormente, durante a aquisição da nuvem de pontos dever-se-á evitar que reflita ou deixe passar a luz emitida pelo laser, para que desta forma o Scanner consiga fazer a aquisição de dados e assim constituir a nuvem de pontos. Por isso, a peça foi pulverizada com um pó revelador, de modo a atenuar a possibilidade de reflexão do feixe laser. Após estar garantido o tratamento superficial da peça, esta foi colocada no interior da câmara do Scanner, sobre o “prato giratório”, utilizando uma base de apoio (figura 4.49).

Para aquisição da nuvem de pontos foi utilizado o *software* Dr. Picza3[®], optando-se pela geometria planar que foi já devidamente explicitada anteriormente. Realizaram-se duas aquisições de dados, uma com o molde posicionado na vertical e outra com o molde posicionado na horizontal, para desta forma ser possível eliminar os “ângulos mortos”, garantindo assim a aquisição total da geometria da peça.

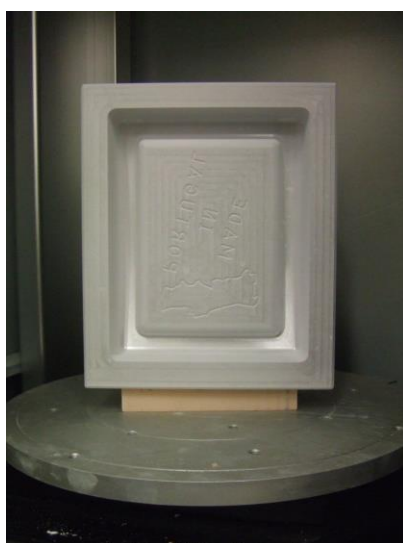


Figura 4.49 – Molde pulverizado com o pó revelador, colocado no centro do prato do Scanner e posicionado na vertical.

4.3.4.2. TRATAMENTO DA NUVEM DE PONTOS E MALHA POLIGONAL

Tal como no Exemplo 1 – Trabalho 2D, para tratamento da nuvem de pontos adquirida, foi utilizado também neste caso o *software* GEOMAGIC STUDIO[®] 2014 – TRIAL, cedido pela Geomagic Foundation, sendo assim realizada a importação das nuvens de pontos que se apresentam em seguida sem qualquer manipulação.

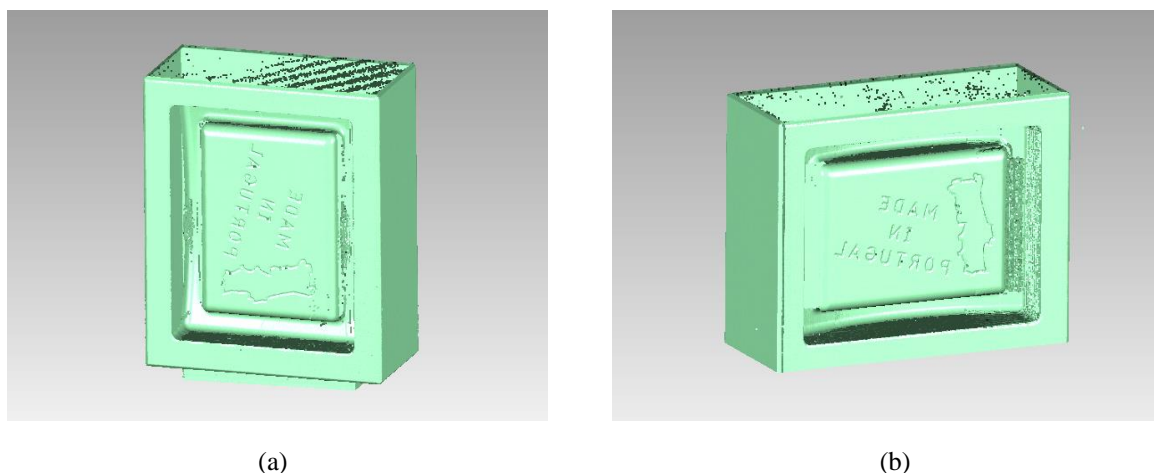


Figura 4.50 – Nuvens de pontos em ambiente Geomagic: 1ª Digitalização (a); 2ª Digitalização (b).

Inicialmente foi realizada a remoção manual do ruído existente nas nuvens de pontos. Para tal, usaram-se o comando reduzir ruído, em conjunto com os comandos, sombrear, adicionar, eliminar e selecionar pontos. Estes foram usados com o objetivo de reparar e simplificar a referida nuvem de pontos.

Após esta primeira etapa, e garantindo-se sempre a simplificação dos pontos, procedeu-se à conversão do conjunto de pontos em malha de polígonos, usando para o efeito o comando *wrap*. Esta conversão consiste basicamente na conversão dos pontos em triângulos, e por isso também ser usual nomear-se de malha poligonal ou triangular.

Após a conversão da nuvem de pontos em malha poligonal, constatou-se que o número de triângulos era demasiado elevado, no entanto aquando da conversão da nuvem de pontos em malha triangular é essencial um elevado número de triângulos. Contudo nos processos de reparação, suavização e preenchimento dever-se-á reduzir o número de triângulos que compõem a malha triangular por forma a que seja mais fácil executar os ditos procedimentos, mas garantindo sempre que o número de triângulos seja suficiente para que a geometria da peça não sofra alterações profundas.

Como é possível observar-se nas figuras seguintes, a malha final poligonal apresenta grandes melhorias, isenta de irregularidades.

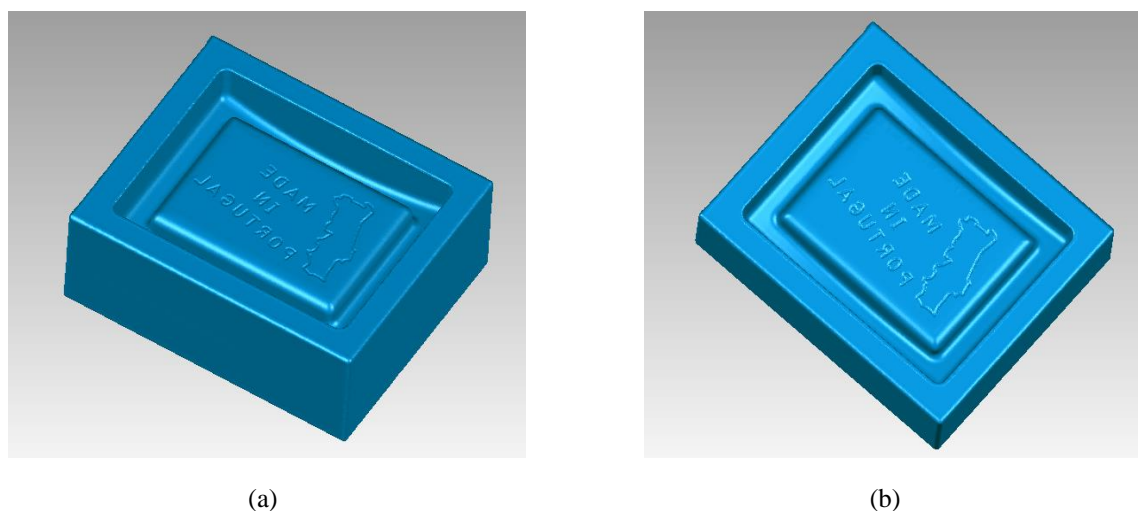


Figura 4.51 – Resultado da malha poligonal: Superfície gerada a partir da nuvem de pontos (a e b).

Conforme já se referiu anteriormente, no *software* MASTERCAM® todos os ciclos foram definidos com uma tolerância máxima de erro de 0,02 mm. Após a digitalização deve ter-se em conta que a precisão do scanner é de 0,2 mm e que por este motivo, erros dimensionais abaixo deste valor poderão resultar do processo de aquisição da nuvem de pontos.

A figura 4.52 ilustra a comparação entre a geometria CAD original e o molde digitalizado. Para uma correta interpretação desta figura é importante informar o leitor que os desvios dimensionais positivos correspondem a uma menor dimensão no molde fabricado comparativamente com o modelo CAD do qual se partiu. A parede lateral de cor laranja não deve ser considerada na interpretação dimensional, porque se tornou necessário inseri-la “manualmente”.

Com base na figura apresentada é possível constatar que o molde digitalizado e o modelo CAD inicial apresentam em quase todas as superfícies diferenças dimensionais inferiores à resolução do scanner laser. Contudo, observa-se que os chanfros exteriores do molde e o texto se encontram com a cor amarela, sendo isto interpretado como que o molde produzido apresente uma cota inferior ao modelo CAD nas regiões mencionadas. Este facto não se deve a qualquer erro dimensional de fabrico, mas ao facto do modelo CAD que foi utilizado para a comparação não ter as arestas exteriores chanfradas nem a inscrição do texto, conforme pode ser observado no modelo CAD da figura 4.36.

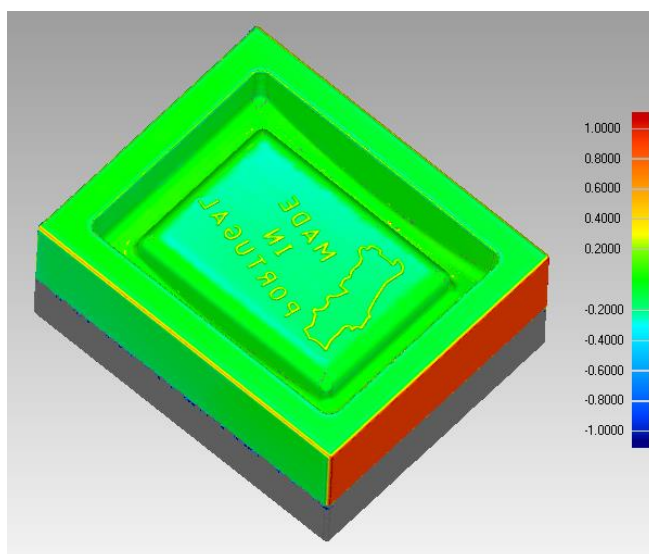


Figura 4.52 – Diferença dimensional global entre a geometria CAD original e o molde digitalizado.

5. CONCLUSÃO

No âmbito deste trabalho foi inicialmente realizado um trabalho de pesquisa, o qual implicou um conhecimento mais aprofundado do processo de fresagem. Os conhecimentos adquiridos foram em grande parte aplicados no processo de aprendizagem das tecnologias CAD/CAM e nos trabalhos experimentais realizados.

Da análise da programação dos ciclos de maquinagem com o software Mastercam é possível concluir que os ciclos disponíveis para geometrias 2D são em menor número, e com parametrização mais simples e intuitiva. Por seu turno, os ciclos disponíveis para geometrias 3D são em maior número, alargando assim o leque de estratégias de maquinagem disponíveis. Este facto torna a programação 3D mais complexa, com múltiplas especificidades, mas possibilita o fabrico de componentes de maior complexidade.

No que diz respeito ao pós-processamento, tal como é sabido, os programas CNC gerados a partir de ciclos para geometrias 2D são bastante mais curtos o que implica tempos de maquinagem mais reduzidos. Por este motivo, sempre que as geometrias a produzir sejam possíveis de programar com ciclos para geometrias 2D, aconselha-se vivamente esta metodologia do ponto de vista da produtividade.

A incorporação da engenharia inversa conjuntamente com as tecnologias CAD/CAM no processo produtivo são uma área ainda relativamente recente, demonstrando grandes potencialidades, tal como foi exemplificado em ambos os trabalhos experimentais realizados. De facto foi aqui exemplificada a possibilidade de obter modelos CAD a partir de peças mecânicas existentes e, a partir daí, eventualmente iniciar a programação dos ciclos de maquinagem de um componente do qual a informação era escassa. Além disso, foi também demonstrada a possibilidade de utilizar esta ferramenta para analisar os desvios dimensionais entre o modelo e o componente produzido, que eventualmente possam ocorrer durante o processo de fabrico.

Relativamente a desenvolvimentos futuros, seria interessante a realização de um estudo aproveitando todo o trabalho de pesquisa executado para aplicar à maquinagem em cinco eixos e posterior utilização da Engenharia Inversa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOHEZ, E. (2002). *Compensating for systematic errors in 5-axis NC machining*. Computer-Aided Design, Elsevier
- CAVALHEIRO, (1998) - A. Z. *Sistematização do Planejamento da Programação via CAM do Fresamento de Cavidades de Moldes para Peças Injetadas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- CEBALO, R. (1999) – *Machined Surface Quality by High Speed Milling*, 5th International Scientific Conference on Production Engineering, Opatija, Croat.
- COMPLETO, A., FESTAS, A. e DAVIM, J. (2009). *Tecnologia de fabrico*, Publindústria.
- GEOMAGIC STUDIO 2014 – TRIAL, Geomagic Foundation Software, USA.
- FERRARESI, DINO (1977) – *Fundamentos da Maquinagem dos Materiais*, Editora Edgard Blucher.
- FOGGIATO, José Aguiomar (2006) – *O uso da Prototipagem rápida na área médico-odontológica*. Revista Tecnologia & Humanismo, Curitiba, UTFPR
- JUNG, Y., LEE, D., KIM, J., & MOK, H. (2002). *NC post-processor for 5-axis milling machine of table-rotating/tilting type*. Journal of Materials Processing Technology.
- MIRALLES, C. (2009). *Análise de Estratégias de Corte no Fresamento com 5 eixos*. Tese de Mestrado - Universidade Metodista de Piracicaba (São Paulo).
- MUNDO CNC (n,d). <http://www.mundocnc.com.br>. Américo Luis de Azevedo (página internet oficial), Brasil.
- RAJA, V e Fernandes, K. J., 2008, *Reverse Engineering – An industrial Perspective*. Springer Science.
- RELVAS, C. (2002). *Controlo Numérico Computorizado – Conceitos Fundamentais*, Publindústria.
- SILVA, Alex Sandro de Araújo. (2006) - *Desenvolvimento Integrado CAD/CAM de Componentes para turbinas a Gás*. - Tese de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- SCHULZ, H. (1999) - *The History of High Speed Machining*. Revista de Ciência e Tecnologia, Piracicaba.

SOUZA, A. e ULBRICH, C. (2009). *Engenharia Integrada por Computador e Sistemas – CAD/CAM/CNC – Princípios e Aplicações*. Artliber – Editora.

RUTKAUSKAS, M. G. *Diretrizes para Otimização do Modelamento Geométrico de Peças de Carrocerias*. Dissertação de Mestrado. USP, São Paulo, 2005.

VOISINET, DONALD D. (1988) – CADD – *Projeto e desenho auxiliado por computador*. São Paulo, McGraw-Hill

ZELINSKI, Peter (1998). *Four types of five-axis machining centers*. Modern Machine Shop.

Gomes, A., Maranha, V. e Santos Vitor (2013). *Tecnologias de Fabrico – Relatório*. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra – Departamento de Engenharia Mecânica.

ANEXOS